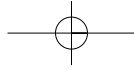


## STOFFGESCHICHTEN

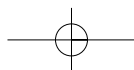
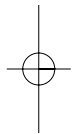
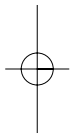
Die Dinge und Materialien, mit denen wir täglich hantieren, haben oft weite Wege hinter sich, ehe sie zu uns gelangen und von uns genutzt werden. Ihre wechselvolle Vorgeschichte wird aber im fertigen Produkt ausgeblendet. Das Produkt, das wir an der Kasse kaufen, präsentiert sich uns als neu und geschichtslos. Wenn man seiner Vorgeschichte nachgeht, stößt man auf Überraschendes und Erstaunliches. Auch Verdrängtes und Unbewußtes taucht auf. Gerade am Leitfaden der Stoffe zeigen sich die Konflikte unserer globalisierten Welt.

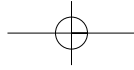
Deshalb stellen die Bände der Reihe Stoffgeschichten einzelne Stoffe in den Mittelpunkt der Analyse. Sie sind die oftmals widerspenstigen Helden, die eigensinnigen Protagonisten unserer Geschichten. Ausgewählt und dargestellt werden Stoffe, die gesellschaftlich oder politisch relevant sind, Stoffe, die Geschichte schreiben oder geschrieben haben. Stoffgeschichten erzählen von den Landschaften, von den gesellschaftlichen Szenen, die jene Stoffe, mit denen wir täglich hantieren, durchquert haben. Sie berichten von den globalen, teilweise sogar kosmischen Wegen, welche viele Stoffe hinter sich haben.

STAUB – SPIEGEL DER UMWELT ist der erste Band der Reihe. Denn der Staub ist so etwas wie der Anfang alles Stofflichen – und sein Ende. Zugleich ist Staub ein politisch relevanter Stoff, wie die Diskussionen um Feinstäube und um die Grenzwerte für Schwebstaub zeigen.

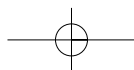
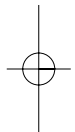
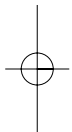


## STAUBBUCH





## IMPRESSUM



## INHALT

Vorwort .....	7
<i>Jens Soentgen und Knut Völzke</i>	
<b>I. KULTUR UND NATUR DES STAUBES .....</b>	<b>13</b>
Die Kulturgeschichte des Staubes .....	15
<i>Jens Soentgen</i>	
Tanzende Staubkörner und Nanomaschinen – Ein Ausflug in die Welt des Kleinen .....	32
<i>Manfred Euler</i>	
Die Weltherrin und ihr Schatten .....	54
<i>Felix Auerbach</i>	
<b>II. VOM KOSMISCHEN STAUB ZUR WOLLMAUS: REISE DURCH EIN VERSTAUBTES UNIVERSUM .....</b>	<b>69</b>
<b>A. STERNENSTAUB UND BLÜTENPOLLEN: STAUB DER NATUR</b>	
Stardust memory – Kosmischer Staub und die Methoden seiner Erforschung .....	72
<i>Thomas Stephan</i>	
Dicke Luft – Der Staub in der Atmosphäre .....	83
<i>Martin Ebert</i>	
Vom Winde verweht – Mineralstaub in der Atmosphäre .....	95
<i>Lothar Schütz</i>	
Archive der Natur – Blütenstaub als Schlüssel zur Erforschung vergangener Landschaften .....	103
<i>Arne Friedmann, Martinus Fesq-Martin und Michael Peters</i>	
Blütenstaub und Rosenfieber – Die Bedeutung von Pollen in der Geschichte von Biologie und Medizin .....	117
<i>Martinus Fesq-Martin, Arne Friedmann und Heike Fesq</i>	



## B. Dieselschmutz und Hautschuppen: Staub der Menschen

Staub – die unterschätzte Gefahr .....	126
<i>Rainer Remus</i>	
Kleine Teile – große Wirkung?	
Über Chancen und Risiken von Funktionsstäuben und nanoskaligen Materialien .....	143
<i>Armin Reller</i>	
Krank durch Feinstaub? – Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die Gesundheit .....	150
<i>Annette Peters</i>	
Staubfeine Spuren – Ihre Analytik in der Kriminaltechnik .....	154
<i>Thomas Biermann, Andreas Hellmann, Erik Krupicka, Michael Pütz und Rüdiger Schumacher</i>	
Der letzte Dreck – Über Hausstaub und das Leben in der Staubwolke .....	163
<i>Luitgard Marschall</i>	

## C. Staublappen und Reinraumtechnik: Kämpfe gegen den Staub

Bücherstaub – Streifzug durch ein unerfreuliches Terrain vom Altertum bis heute .....	180
<i>Ulrich Hohoff</i>	
Verstaubte Kunst – Die Arbeit der Restauratoren .....	207
<i>Stephanie Jaeckel</i>	
Warum macht Putzen glücklich? – Interview mit einer Psychoanalytikerin .....	222
<i>Elfie Porz und Jens Soentgen</i>	
Der reine Raum – Hochsauberkeitstrakt für Halbleiter-Hirne .....	231
<i>Frank Grünberg</i>	

## III. ANHANG .....

Glossar .....	245
Über den Staub – eine Zitatensammlung .....	253
Angaben zu den Autorinnen und Autoren .....	257
Dank .....	262

## VORWORT

Täglich sammeln wir Staub – wenn wir uns in einem Raum aufhalten, wenn wir durch eine Wiese oder über eine Straße gehen oder auch in einem Buch lesen – und täglich versuchen wir, ihn wieder loszuwerden: Mit Lappen, Bürsten, Staubtüchern, Staubsauger, Staubwedel.

Auch Wissenschaftler sammeln Staub, allerdings freiwillig und mit ausgeklügelten Apparaturen. Was vom Alltagsmenschen kaum wahrgenommen wird, ist für den Forscher spannend. Staub wurde auch in der Wissenschaft lange Zeit unterschätzt als ein zwar lästiger, im ganzen aber unerheblicher Bestandteil der Atmosphäre. Heute erkennen die Umweltwissenschaften immer mehr den zentralen Stellenwert des Umweltfaktors Staub.

Nicht nur seine gesundheitliche Bedeutung, auch seine Rolle im Klimasystem und innerhalb des globalen Ökosystems rücken dabei ins Zentrum der Aufmerksamkeit. Neue Analysemethoden wie insbesondere die Rastertunnelmikroskopie erlauben es erstmals, Staub mit einer bis vor wenigen Jahren noch nicht gekannten Präzision zu charakterisieren und seine Bewegungen genau zu verfolgen. Moderne Staubforscher können aus wenigen Milligramm Staub viel über den Zustand unserer Umwelt herauslesen. Tatsächlich ähneln die winzigen Partikel, mit denen sich Staubforscher beschäftigen, den Fundstücken, die der Archäologe interpretiert. Sie sind nur um mehrere Größenordnungen kleiner. So ist der Staub heute nicht mehr nur ein störender Dreck, der allenthalben entsteht. Er erzählt Geschichten: Geschichten über den Zustand unserer Umwelt, über ökologische Zusammenhänge, über kosmische Ereignisse und über die Welten der Vergangenheit. Einige dieser Geschichten, die man aus dem Staub herauslesen kann, möchten wir im folgenden Buch vorstellen.

Wir eröffnen mit einer Betrachtung von *Jens Soentgen* über die Kulturgeschichte des Staubes, die von zwei Essays gefolgt wird, welche die

naturwissenschaftlichen Aspekte des Phänomens Staub verdeutlichen: *Manfred Euler* zeigt, dass im Bereich des Staubfeinen zwar grundsätzlich dieselben Gesetze gelten wie im makroskopischen Bereich, jedoch einzelne Kräfte sich stärker bemerkbar machen. Deshalb haben Dimensionen (Größenordnungen) eine echte physikalische Bedeutung. Am Beispiel der Mikro-Makrophantasien in Gullivers Reisen erörtert Euler, was im Reich des Kleinen möglich ist und was nicht. Der folgende Text von *Felix Auerbach* ist hundert Jahre alt. Auerbach bietet eine geistreiche und verständliche Einführung des Entropiebegriffs. Meist wird Entropie mit Chaos gleichgesetzt. Das ist nicht ganz falsch, aber doch zu grob. Auerbach zeigt demgegenüber, worauf es ankommt: nämlich auf ein Verständnis des Zusammenhangs von Energie und Entropie. Diesen Zusammenhang arbeitet er in seinem Text heraus.

Nach dieser Vorstellung allgemeiner Aspekte, die für ein Verständnis des Staubes entscheidend sind, unternehmen wir eine Reise durch ein verstaubtes Universum – von den Sternen bis zur „Personal Cloud“, der persönlichen Staubwolke, die jeden von uns umgibt. Überall nehmen wir einige Proben Staub mit und hören auf die Geschichten, die dieser fahrende Geselle zu erzählen weiß. Und das sind unsere Stationen:

Wir beginnen mit dem Weltraumstaub, über den *Thomas Stephan* berichtet. Weltraumstaub wird in der Stratosphäre, 20 Kilometer über der Erdoberfläche, aufwendig eingesammelt. Theoretisch rieselt dieser kosmische Staub überall nieder und findet sich auf jeder Tischplatte. Es ist jedoch praktisch unmöglich, ihn dort unter den Abermillionen anderen Staubteilchen in seiner Nachbarschaft zu erkennen. Daher werden besondere Flugzeuge eigens mit speziellen Staubsammlern bestückt, um diese vereinzelteten Körnchen einzusammeln. Die Mühe lohnt sich: Denn manche Partikel, die man auf diese Weise findet, sind sehr alt. Sie bergen Informationen über die Zeit, in der unser Sonnensystem noch jung war.

Dann nähern wir uns der Erde und ihrer Atmosphäre, in der der Staub eine vielfältige und wichtige Rolle spielt, über die der Text von *Martin Ebert* aufklärt. Er verdeutlicht, dass unsere Vorstellungen von den wichtigsten Staubquellen der Korrektur bedürfen. Zwar gelangt viel Schmutz durch Kamine und Auspuffanlagen in die Umwelt, doch auch die Natur selbst staubt kräftig. Wüsten, Vulkane, aber auch die Meere sind wichtige Staubquellen.

An Eberts Arbeit schließt der Text von *Lothar Schütz* an, der von der Rolle des Staubes in der Atmosphäre handelt. Man verbindet mit

Staub in der Luft meist negative Dinge. In den Szenarien der 80er Jahre zum „nuklearen Winter“ war der von den Explosionen und Bränden eines befürchteten nuklearen Krieges aufgewirbelte Staub sogar verantwortlich für dramatische Klimastürze. Schütz' Beitrag zeigt, dass Staub in der Atmosphäre viele lebenswichtige Prozesse in Gang hält – etwa den Wasserkreislauf, der ohne Staubpartikel, an denen das Wasser kondensieren kann, gar nicht stattfinden würde.

Schließlich landen wir auf der Erde selbst. Auf dem Boden. Und der ist nichts anderes als eine Art festgetretener Staub. Dieser Staub ist, so stellt man sich vor, der zerstörte, durcheinandergewirbelte Rest vergangener Zeiten. Es gibt jedoch Orte, an denen der Staub der Zeit so sorgsam und penibel abgespeichert und in hunderten Lagen übereinandergeschichtet ist, dass man aus seiner Analyse ein Bild vergangener Zeiten entstehen lassen kann. Mit dieser Kunst beschäftigen sich *Arne Friedmann*, *Martinus Fesq-Martin* und *Michael Peters* in ihrem Text. Sie zeigen, dass Hochmoore nicht nur besondere Lebensräume sind, sondern zugleich Umweltarchive, die uns ein Zeugnis vergangener Zeiten überliefern, welches wir auf keine andere Weise gewinnen könnten.

Mit den natürlichen Stäuben befassen sich im Anschluss *Martinus Fesq-Martin*, *Arne Friedmann* und *Heike Fesq* in einer kulturhistorischen Betrachtung über die Pollenstäube und das sogenannte Rosenfieber. Allergien sind zwar erst in unserer Zeit weit verbreitet, jedoch ist das Krankheitsbild schon länger bekannt.

Über die Welt der Pflanzen nähern wir uns der Sphäre der Menschen und damit den anthropogenen Stäuben. Die Industrie ist neben der Hausfeuerung und dem Verkehr der wichtigste Staubemittent. Die Industriestäube, auf die *Rainer Remus* in seinem Beitrag eingeht, zeigen durch ihren hohen Rußanteil, dass der Mensch immer noch der alte Feuermacher ist. Nur dass die Feuer heute in Kessel oder Motoren verlagert wurden und auf diese Weise der Anschein befördert wird, als seien sie verschwunden.

Im Anschluss diskutiert *Armin Reller* die Chancen und Risiken moderner Funktionsstäube und nanoskaliger Strukturen. Denn längst hat die Technik erkannt, dass sehr kleine Teilchen und Strukturen oft andere Eigenschaften haben als größere Portionen desselben Materials. Die Nanotechnologie beschäftigt sich mit der systematischen Funktionalisierung dieser Eigenschaften. Von der Nanotechnologie erhofft man sich innovative Lösungen in ganz unterschiedlichen Bereichen, von der Medizin und Pharmakologie bis hin zu neuen Werk-

stoffen. Es können von ihr aber auch bestimmte Risiken ausgehen, die Reller an Beispielen diskutiert.

Den Risiken staubfeiner Partikel widmet sich auch *Annette Peters* in ihrem Beitrag über die gesundheitlichen Wirkungen des Feinstaubes. Diese Art Staub wird gegenwärtig im Kontext der aktuellen Feinstaubdiskussion kontrovers diskutiert. Annette Peters formuliert eine auf aktuellen Daten und epidemiologischen Studien basierende Einschätzung.

Schließlich kommen wir bei jenem alten Bekannten an – beim Hausstaub. Er ist, da wir über 70 Prozent unseres Daseins in geschlossenen Räumen verbringen, die bekannteste und vielleicht auch wichtigste Staubart. So, wie der Staub auf den Straßen mit seinem Rußanteil ein Bild vom Menschen als Feuermacher gibt, zeigt der Hausstaub den Menschen als ein Wesen, das sich kleidet. Textilfasern stellen mit gut 80 Prozent den Hauptanteil des Hausstaubes. Er regeneriert sich unaufhörlich und beherbergt obendrein, wie die Wissenschaft herausgefunden hat, viele unangenehme Gesellen, die Milben, kleine Spinnentiere, die sich von den Hautschuppen ernähren, welche aus ihrer Sicht wie Manna vom Himmel fallen. Und wenn das Manna mal nicht reicht, dann verzehren sich die Milben gelegentlich auch gegenseitig und heißen dann Killermilben. *Luitgard Marschall* beschreibt, was im Hausstaub so alles drinsteckt und was die Staubforscher dazu sagen.

Der in einer Wohnung oder in einem Auto befindliche Staub ist auch für Kriminaltechniker von Interesse. Denn der Kriminaltechniker weiß, dass dort, wo ein Mensch war, sich stets auch Spuren von ihm finden – staubfeine Spuren. Wie man diese Staubspuren sichert, analysiert und bewertet, berichtet der Beitrag von *Thomas Biermann, Andreas Hellmann, Erik Krupicka, Michael Pütz und Rüdiger Schumacher* aus dem Bundeskriminalamt.

Bis hierher war unsere Reise dem Verständnis des Phänomens Staub und seinen Wirkungen und Funktionen gewidmet. Natürlich ist aber Staub in der Menschenwelt meist unwillkommen. Daher widmen sich die vier letzten Beiträge vielfältigen Versuchen, ihn loszuwerden. *Ulrich Hohoff* schreibt in seinem Essay über den Bücherstaub, ein alltägliches und doch nur selten behandeltes Thema. Seit dem Altertum führen Bibliothekare einen Kampf gegen den Staub, der zugleich ein Kampf gegen das Vergessen ist. Hohoff zeigt einige wichtige Stationen und Instrumente dieser Auseinandersetzung auf.

Auch Museen sind Orte, an denen Staub aber besonders unwillkommen ist. Wie man den Staub wieder von den Bildern herunterbe-

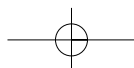
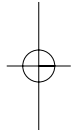
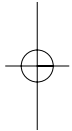
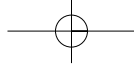
kommt – und wie man in manchen Fällen sogar besondere Staubimitate applizieren muss, um ein altes Bild wieder auf Vordermann zu bringen, zeigt Stephanie Jaeckel in ihrem Beitrag.

Das Interview mit der Psychoanalytikerin *Elfie Porz* handelt von Freud' und Leid einer alltäglichen Beschäftigung, dem Putzen. Die Rede ist von „Chaoten“ und Systematikern“ im häuslichen nimmer endenden Kampf gegen den Dreck. Elfie Porz unterscheidet verschiedene Putztypen – auch als Einladung an die Leser, sich möglicherweise im einen oder anderen Bild wiederzuerkennen.

Die Reise endet da, wo viele, die vom Staub geplagt werden, gern hinmöchten: im staubfreien Raum. Natürlich gibt es einen solchen Raum nicht – Staub ist *überall* (auch auf dieser Seite). Doch man kann ihm aus dem Wege gehen und seine Konzentration in der Luft reduzieren. Von den japanischen Lackmalern berichtet die Legende, sie seien auf hohe See gefahren, um dort zu arbeiten, konnten doch ihre Lackierungen durch jedes mittelgroße Staubfädchen, das auf der Oberfläche anhaftet, beeinträchtigt werden. In einer noch viel dramatischeren Lage sind die Hersteller von mikroelektronischen Bauelementen. Ihre Produktion kann durch Staub geradezu ruiniert werden. Denn feine Partikel, die sich auf Chips absetzen, bringen den Schaltplan durcheinander. Daher müssen die Chiphersteller dafür sorgen, dass in ihren Produktionsräumen eine maximal staubfreie Luft weht. Die Reinraumtechnik hat das Ziel, Räume staubfrei zu machen. Ihre Fortschritte in den letzten 20 Jahren sind so außergewöhnlich, dass man von einer der wichtigsten Technologien unserer Zeit sprechen kann. Ohne die Reinraumtechnik wäre der Aufstieg der Mikroelektronik nicht möglich gewesen. Verständlich: Denn wer winzige, staubfeine Bauelemente herstellt, muß zusehen, dass der natürliche Staub ihm nicht sein Werk ruiniert. Wie Reinräume funktionieren, erzählt *Frank Grünberg* in der letzten Geschichte dieses Bandes.

Das Buch erscheint begleitend zu der Ausstellung STAUB – SPIEGEL DER UMWELT. Die Ausstellung wurde konzipiert von Knut Völzke und Jens Soentgen für das Wissenschaftszentrum Umwelt der Universität Augsburg. Gezeigt wird die Ausstellung seit November 2004 an der Universität Augsburg.

Augsburg und Frankfurt am Main, im Juni 2005  
Jens Soentgen und Knut Völzke



## TEIL I: KULTUR UND NATUR DES STAUBES

Staub begleitet den Menschen seit Anbeginn. Denn bei allem, was der Mensch tut, entsteht Staub – beim Feuermachen, beim Pflügen der Erde, selbst beim bloßen Herumlaufen oder Haarekämmen! Und dann ist da noch derjenige Staub, den die Natur freigiebig über den Menschen rieseln lässt – der Staub der Vulkane, der Wüsten, der Bäume und Pflanzen und natürlich der kosmische Staub. Wie reagieren die Menschen auf den Staub, der sie umgibt? Welche Rolle hatte er in den antiken Kulturen, und welche Rolle spielt er heute? Und: Gibt es eigene Naturgesetze, die für diesen fahrenden Gesellen und unruhigen Typ gelten?



Staub - Spiegel der Umwelt / hrsg. von Jens Soentgen und Knut Völzke. - 1. Aufl. . - München : oekom-Verlag, 2006. - 272 Ill. . - ISBN: 3-936581-60-6. - (Stoffgeschichten ; 1) <http://www.oekom.de/buecher/buchreihen/stoffgeschichten/buch/staub>.

JENS SOENTGEN

## DIE KULTURGESCHICHTE DES STAUBES

Staub begleitet den Menschen seit Anbeginn. Davon legen die Familiennamen ein beredtes Zeugnis ab. Stuyvesant, der Familienname des ersten Bürgermeisters von New York, bezeichnet einen flotten Reiter, „der Sand aufstäubt“. Und Stoiber, der Name des bayerischen Ministerpräsidenten, bezeichnet laut Familiennamen-Duden einen „unruhigen Menschen, der Staub aufwirbelt“. Und nicht nur jeder einzelne, auch jede Kultur hat eine besondere Beziehung zum Staub.

Im Judentum und später auch im Christentum war der Staub vielfach nur ein *memento mori*, er galt als eine Aussaat der Gräber, die Erinnerung an die Nichtigkeit allen irdischen Daseins. Vom Staub, so lesen wir etwa im Buch *Kohelet*, sind Mensch und Tier genommen, zum Staub kehren sie wieder zurück. Zum Zeichen der Trauer streute man sich Staub oder Asche über Haupt und Gesicht – eine Sitte, die bereits bei den Ägyptern belegt ist. Staub war, vielleicht wegen seiner lästigen Allgegenwart in den ariden Zonen, ein Symbol für das Verächtlichste, das man sich denken konnte. Zugleich hatte der Staub Teil an umfangreichen Systemen der Berührungsmagie. Dem Staub vom Altar hat man dabei eine besonders dämonische Wirkung zugeschrieben. Er wurde, wie im vierten Buch des Mose zu lesen ist, zusammen mit einem Glas Wasser Frauen verabreicht, die von ihren eifersüchtigen Ehemännern der Untreue verdächtigt wurden. Der Staub sollte, im Falle, dass die Ehefrau schuldig wäre, in ihrem Leib grausige Veränderungen anrichten.

Die Griechen hatten ein eher spielerisches Verhältnis zum Staub – er gehörte nicht nur unvermeidlich zum Alltagsleben dazu, sondern war zugleich auch ein nützlicher, sogar ein gesuchter Stoff. Die Gymnasien hatten einen eigenen Bezirk, das *Konisterion*, welches mit feinem Staubsand bedeckt war – hier wurde gerungen. Der staubige Boden war für das Ringen unerlässlich, da man auf eine weiche

Unterlage bedacht sein musste. Zugleich war der Staub auch erforderlich, um den geölten Gliedern die Glätte zu nehmen und einen festen Griff zu ermöglichen. Bisweilen bewarfen sich die Gegner absichtlich mit Staubsand. Später erlangte dieser auch eine hohe Bedeutung für Hygiene und Ernährung. Bei verschiedenen Krankheiten verordneten die Ärzte Stäube, die teils einzunehmen, teils auf den Körper aufzustreuen waren. Und ebenso, wie zum Salben das feinste und kostbarste Öl genommen wurde, so suchte man auch die feinste Sorte Staub zu beschaffen. Man fand sie in Ägypten. Schon die Generale Alexanders des Großen (356–323 v. Chr.) führten ägyptischen Staubsand auf ihren Zügen mit, solcher spezieller Staub war ein regelrechter Luxusartikel. Sueton (ca. 70–140 n. Chr.) berichtet von einer Empörung, die in Alexandria sich Bahn brach, als mitten in einer Hungersnot die Ankunft eines Schiffes mit einer Ladung feinsten Staubsandes für die Hofringkämpfer gemeldet wurde.

Was gegenüber früheren Zeiten für die unsere in Bezug auf den Staub charakteristisch ist sind vor allem drei Punkte: Zum einen wird Staub verstärkt als Umweltfaktor wahrgenommen, zum anderen gibt es neue Möglichkeiten, staubfeine Teilchen zu analysieren und herzustellen, und drittens ist, damit zusammenhängend, ein verstärktes kognitives Interesse am Thema Staub wahrnehmbar, das dazu geführt hat, dass Staub auch physikalisch als ein eigenes Phänomen wahrgenommen wird.

### STAUB ALS UMWELTFAKTOR

Zwar hat es immer schon Staub gegeben und immer schon wird er bisweilen als lästig empfunden worden sein – doch die modernen, städtischen Kulturen bringen es mit sich, dass neben dem Staub, der natürlicherweise niedergeht, auch noch der sogenannte anthropogene Staub hinzukommt. Der Staub, den der Nachbar erzeugt hat oder „die Industrie“. Warum weckt der Staub solche Ängste? Ein wichtiges Kennzeichen des Staubes ist seine hohe Mobilität. Kieselsteine brauchen lange Zeit, um einen Kilometer weiter zu rollen, ein Staubteilchen kann diese Strecke in wenigen Sekunden zurücklegen. In der Mobilität liegt die Bedrohung, die vom Staub ausgeht. Staub kommt überall hin, durch Ritzen hindurch, durchs Schlüsselloch. Das ist besonders dann kritisch, wenn er giftig ist, wie es zum Beispiel beim radioaktiven Staub der Fall ist. Lungengängiger Feinstaub gelangt bis in die hintersten Alveolen und von dort in die Blutbahn.

Nie zuvor in der Geschichte wurde soviel Staub von Menschen in die Atmosphäre gewirbelt wie in unseren Tagen. Bei allen industriellen Prozessen, bei Bautätigkeit, beim Bergbau, durch den Schienenverkehr oder den Kraftfahrzeugverkehr – entsteht Staub. Dass dieser Staub eine gesundheitliche Relevanz hat, wurde erst mit den Anfängen der Arbeitsmedizin im späten 19. Jahrhundert bekannt. Zur selben Zeit taucht auch das Lemma „Staublunge“ in den Lexika auf. Von dieser unterschied man bald verschiedene Varianten, je nachdem, ob sie auf Kohlestaub, Kalkstaub oder Glasstaub zurückzuführen war. Zuvor gab es, wie es scheint, keine konkrete Krankheitsdefinition, man sprach vielmehr mit Blick auf bestimmte Erkrankungen der Bergarbeiter unspezifisch von „Bergsucht“.

Erst mit der Asbeststaubthematik wurde aus der arbeitsmedizinischen Diskussion um gesundheitsschädliche Wirkungen bestimmter Stäube ein öffentliches Thema. Denn der Asbeststaub betraf, wie sich herausstellte, nicht nur einzelne Berufsgruppen, sondern potentiell jeden, weil Asbest als Zusatzstoff in vielen Baustoffen enthalten war und damit auch in der Luft zahlreicher Gebäude nachgewiesen werden konnte. Daher wurde Asbest zu *dem* Modell für schädlichen Staub, das sich tief in das kulturelle Gedächtnis eingepägt hat. Noch in den gegenwärtigen Diskussionen um die möglichen gesundheitlichen Risiken nanoskaliger Materialien lässt sich implizit oder explizit immer die Asbest-Analogie nachweisen. So werden zum Beispiel Kohlenstoff-Nanotubes oft mit Asbest verglichen, da beide Materialien wie Nadeln wirken.

Seit 1994 ist die Herstellung und Verwendung von Asbest in Deutschland vollständig verboten. Etwas früher, nämlich in den siebziger Jahren, setzten auch energische politische Maßnahmen zur Reduktion von Staubemissionen aus Feuerungs- und Industrieanlagen ein. Der Einbau von Staubabscheidern, besonders auch von Elektroabscheidern in den Anlagen der Eisenhütten- und Stahlindustrie und in Kohlekraftwerke, zeitigte bemerkenswerte Erfolge: die Schwebstaubbelastung in vielen europäischen Städten ist in den letzten Jahrzehnten deutlich zurückgegangen.

Neben dem menschgemachten Staub findet der natürlich vorkommende viel weniger Beachtung, vermutlich deshalb, weil er nicht zum Gegenstand politischer Regelungen und entsprechender Machtkämpfe gemacht werden kann. Dabei macht der natürliche Staub immer noch den Hauptanteil der globalen Staubproduktion aus, auch

wenn die Schätzungen der Experten bei der genauen Bezifferung des Anteils auseinandergehen: er dürfte zwischen 80 und 90 Prozent betragen. Der natürlich vorkommende Staub hat keineswegs nur negative Aspekte. Der Blütenstaub etwa ist für den Fortbestand der Pflanzenwelt unerlässlich. Auch der mineralische Staub, der vom Boden aufgewirbelt wird, hat eine ökologische Funktion. Durch die Staubverwehungen aus der Sahara zum Beispiel werden die Ozeane mit Eisen versorgt, das für die Bildung von Plankton unerlässlich ist. Zugleich spielt das in den Stäuben enthaltene Phosphat eine wichtige Rolle im Ökosystem des Amazonasregenswaldes. Denn bis dorthin werden die Saharastäube verweht.

### STAUBBEOBACHTUNG UND STAUBBEARBEITUNG

Staub ist mehrfach in der Wissenschaft zu einem wichtigen Thema aufgestiegen – und jedesmal war diese Karriere geknüpft an Fortschritte in den Beobachtungstechnologien. So führten die ersten Mikroskopierversuche im 17. und 18. Jahrhundert zu einer ersten Begeisterung für das Winzige.

Im Staub eröffnen sich Welten, so wurde damals erstmals deutlich. Diese hat niemand so emphatisch wie Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716), der Zeitgenosse der ersten Mikroskopierversuche, besungen: *Alles* ist belebt, so lehrt Leibniz in seiner *Monadologie*, jedes noch so kleine Materieteilchen ist ein „Garten voller Pflanzen und ein Teich voller Fische“. An Johann Bernoulli (1667–1748), den Basler Mathematiker, schrieb Leibniz, er sei überzeugt, dass noch im kleinsten Stäubchen Welten enthalten seien, die der unseren an Schönheit und Vielfalt nicht nachstehen. Und im Tod, so schreibt Leibniz, der aus jedem Gedanken eine optimistische Pointe ziehen konnte, vollziehen die Lebewesen den Übergang in solche Welten. Dass im Winzigen möglicherweise auch tödliche Gefahren lauern könnten, zieht der Gelehrte nicht in Betracht.

Stattdessen zog er eine erkenntnistheoretische Konsequenz: So sei die Auffassung kompakter Dinge mit einer stabilen Oberfläche, die uns im Alltag leitet, eine Illusion. Vielmehr sei jedes Ding, das wir sehen, einem Schwarm vergleichbar, von dem in jedem Augenblick feine Teilchen hinwegfliegen und zu dem sich in jedem Augenblick auch neue Teilchen hinzugesellen.

Erst im 19. Jahrhundert begann man systematisch mit der mikroskopischen Erforschung des luftgetragenen Staubes – und entdeckte

einen fliegenden Zoo von Lebewesen, Keimen und Pollen. Dieser wurde bereits 1848 von dem Berliner Biologen Christian Gottfried Ehrenberg (1795–1876) beschrieben. Ehrenberg war der wohl berühmteste Mikroskopiefachmann seiner Zeit – und er hatte sich von Forschungsreisenden aus aller Welt Staubproben zusenden lassen, die er unterm Mikroskop untersuchte. Auch Darwin schickte ihm Staubproben, die er während seiner Forschungsreisen an Bord seines Schiffes „Beagle“ gesammelt hatte. Aus den in diesem Staub enthaltenen Mikroorganismen konnte Ehrenberg auf die Herkunftsregionen der Stäube schließen und bemerkte, dass diese zum Teil sehr weit durch die Luft segelten. Nebenbei entzauberte er einen uralten Mythos: die Legende vom Blutregen. Ehrenberg erkannte, dass der rätselhafte „Blutige Regen“, der, wie Ehrenberg anhand zahlreicher Quellen nachweist, auf viele historische Ereignisse Einfluss hatte, allesamt auf roten Staub, der aus der Atmosphäre ausgewaschen wird, zurückzuführen seien. Doch war diese bedeutende Entdeckung, die er durch umfangreiche historische Studien ergänzte, gleichsam nur ein Nebeneffekt seiner intensiven Beschäftigung mit den luftgetragenen Organismen. Ihrem „großen, organischen, unsichtbaren Wirken und Leben“ galt seine ganze Leidenschaft.

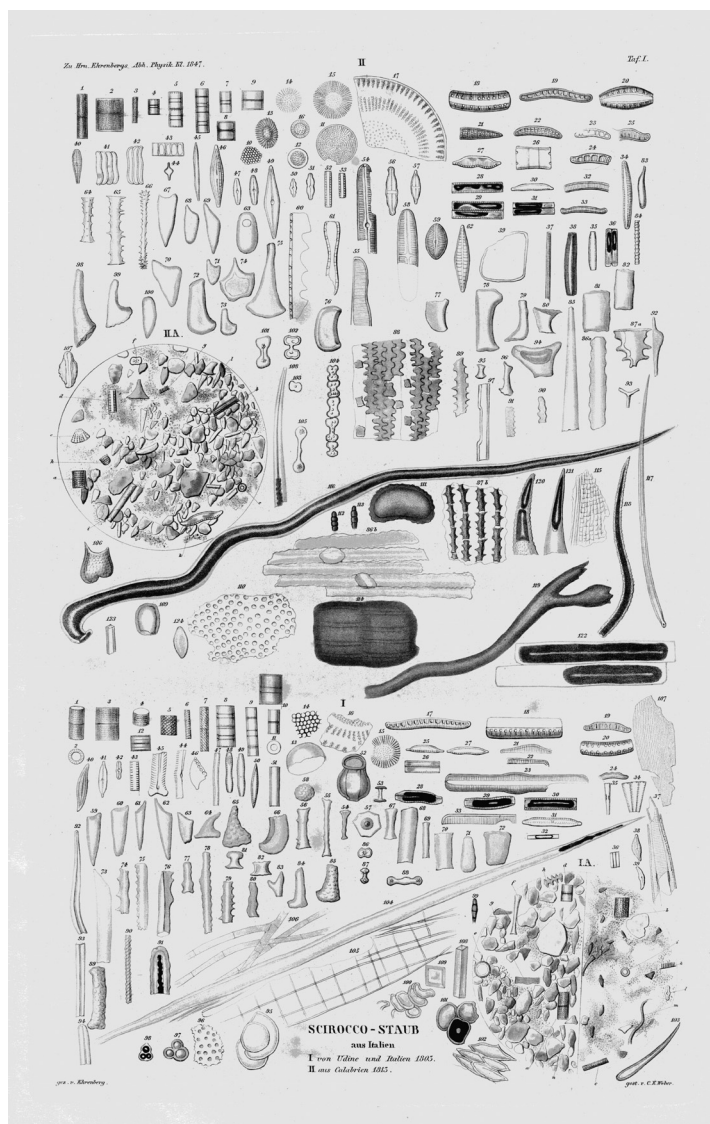
Die gesundheitliche Relevanz dieses organischen Staubes scheint erst durch den britischen Physiker John Tyndall (1820–1893) in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts systematisch untersucht worden zu sein. Tyndall hatte bemerkt, dass auch Luft, die keinen mit dem bloßen Auge erkennbaren Staub mehr enthält, noch Lichtstrahlen streut. Daraus folgerte er, dass auch in dieser Luft noch feine Schwebeteilchen enthalten sein müssen. Da Tyndall über die Keimtheorie des französischen Mediziners Louis Pasteur, gut informiert war, schloss er, dass über diese feinen Schwebeteilchen Krankheiten übertragen werden. Er konnte zeigen, dass in „optisch reiner Luft“, also in Luft, welche keine Schwebeteilchen enthält, Fleischbrühe aufbewahrt werden kann, ohne zu verfaulen. Wurde dieselbe Brühe normaler, staubiger Luft ausgesetzt, war sie bald voll mit Bakterien und Pilzen. Diese Experimente hatten natürlich unmittelbare Konsequenzen für die Hygiene, welche von Tyndall auch sofort gesehen wurden. Der umtriebige Physiker konstruierte Filteranlagen, die alle Schwebeteilchen aus der Luft herausfiltern und deren Einsatz er besonders den Ärzten empfahl. Tyndall nahm auch die erste Messung des Staubgehaltes der Luft in London vor. Heute noch funktionieren viele Staub-

messgeräte, die etwa von Umweltämtern verwendet werden, auf ähnliche Art und Weise, wie jene ersten, die Tyndall einsetzte.

Den nächsten qualitativen Sprung in der Erforschung staubfeiner Partikel brachte die Entwicklung des Rastertunnelmikroskops durch Heinrich Rohrer (\*1933) und Gerd Binnig (\*1947) in den 80 Jahren des 20. Jahrhunderts. Dieses Instrument ermöglicht es, Oberflächenkarten von sehr kleinen Partikeln anzufertigen, die an Genauigkeit jedes lichtmikroskopische Bild weit übertreffen. Sogar atomare Strukturen von wenigen Milliardstel Metern – also Nanometern – können heute kartiert werden. Durch die Entwicklung des Rastertunnelmikroskops können heute sehr kleine Partikel nicht nur präziser charakterisiert, sie können auch einzeln bearbeitet und sozusagen geformt werden. Neue mikrotechnologische Verfahren erlauben einen präzisen Zugriff auch auf winzigste Strukturen.

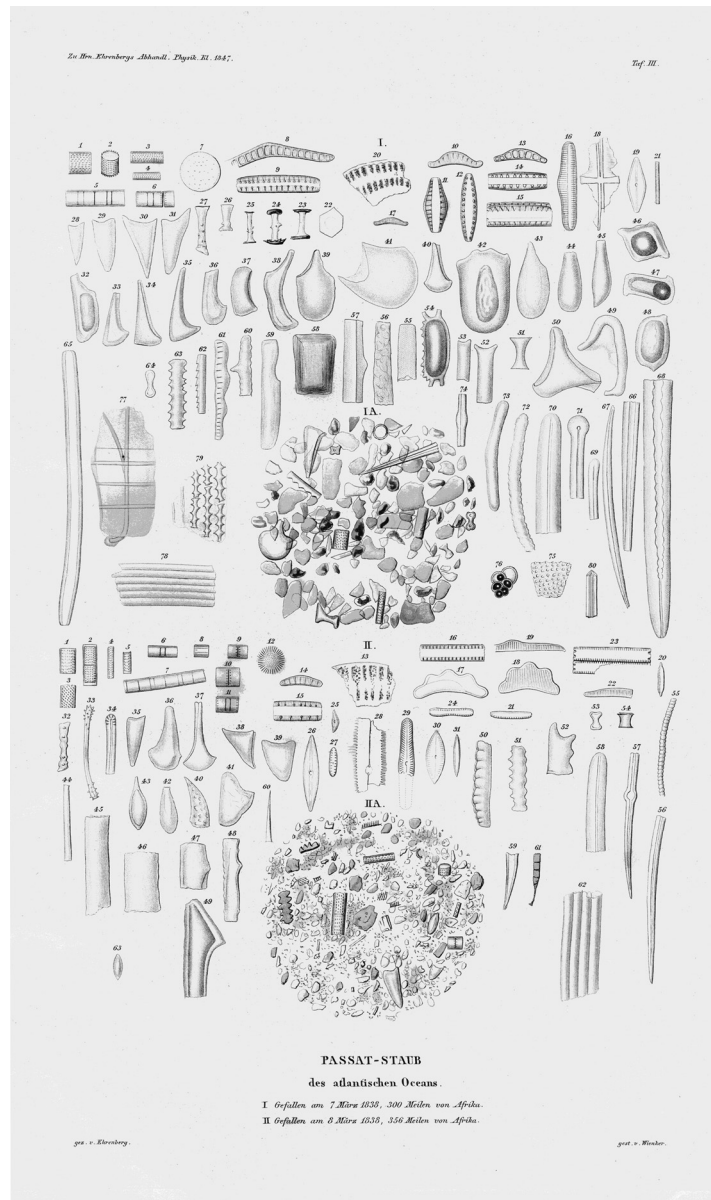
Moderne Staubbforscher sind in der Lage, aus den Eigenschaften und Umgebungen winziger Partikel weitreichende Schlüsse zu ziehen. Kriminalisten vermögen staubfeine Spuren, die am Tatort gesichert wurden, zur Aufklärung von Verbrechen zu nutzen. Wenige Milligramm Material erzählen ihnen Geschichten. Nicht minder virtuos in der Entzifferung des scheinbar Zerstörten sind Planetologen, die aus Teilchen, die gar nicht mehr sichtbar sind und die in der Stratosphäre mit hohem Aufwand gesammelt werden, Informationen über den Urzustand des Weltalls herauslesen. Für Pollenforscher, die sich mit fossilem Staub befassen, entstehen aus den Körnchen, die sie in Mooren sichern, ganze Bilder vergangener Landschaften.

Mit der Entfaltung der Möglichkeiten, Stäube zu analysieren, geht auch die Entfaltung der Techniken, Stäube herzustellen, einher. Das Mahlen ist auch heute noch die mengenmäßig wichtigste Technologie, doch gibt es zahlreiche neuartige Techniken, winzige Teilchen präparativ darzustellen, sei es auf dem wässrigen Weg oder auch durch Verbrennungsprozesse. Man nimmt sich hier gewissermaßen ein Vorbild an der Natur, die ihre Stäube ebenfalls nicht nur durch Verwitterung, sondern durch Prozesse in allen vier Elementen entstehen läßt: Aus dem Feuer (Asche und Rußpartikel), aus der Erde (mineralischer Staub), aus dem Wasser (Salz aus der Windgisch) und auch aus der Luft, wo sich Staubpartikel durch chemische Reaktionen gasiger Bestandteile bilden können. Durch Steuerung der Präparationstechniken können die entstehenden Teilchen in ihren Eigenschaften sehr genau ausgeformt werden. Diese Präparations-







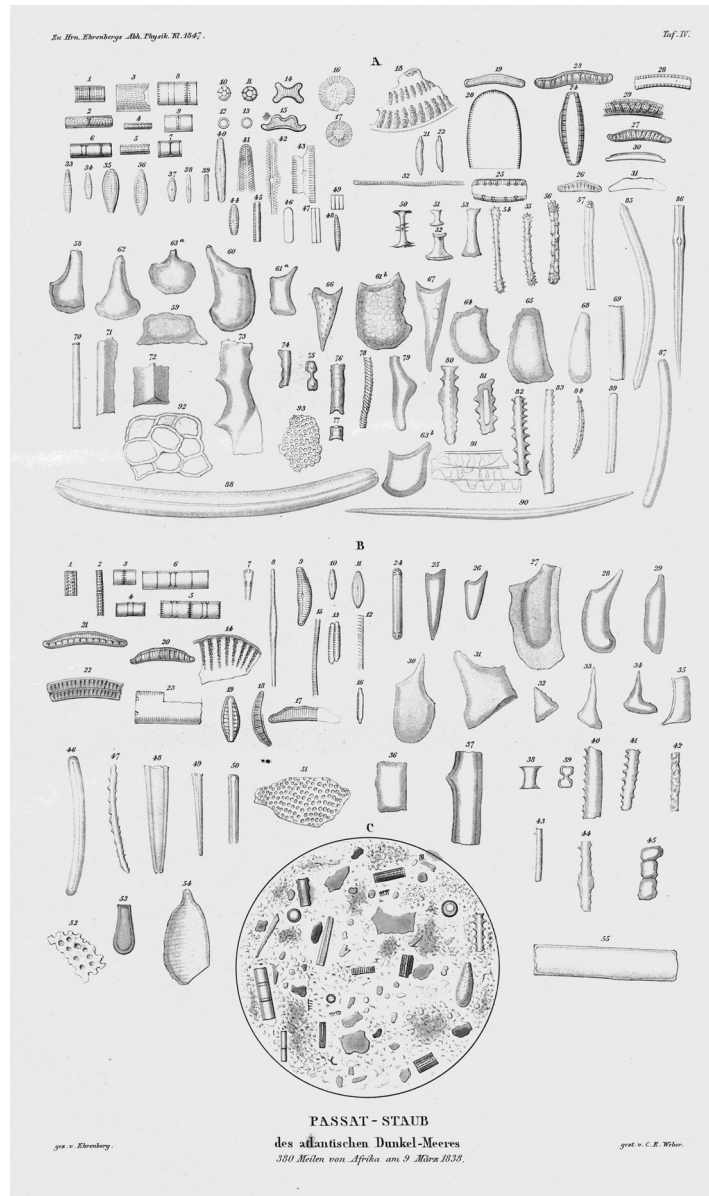


techniken machen einen wichtigen Teil dessen aus, was heute mit dem summarischen Titel Nanotechnologie benannt wird.

Von der Nanotechnologie sagen insbesondere viele Chemiker, dass sie inhaltlich eigentlich viel Altbekanntes enthalte, dem lediglich ein neuer Name gegeben werde. Chemiker seien seit langem gewöhnt, nanoskalige Strukturen präzise herzustellen und präparativ zu gewinnen. Bereits im Mittelalter seien nanoskalige Modifikationen von Stoffen, zum Beispiel das purpurfarbene Goldpigment in Glasfenstern, eingesetzt worden. Nanoskalige Rußpartikel seien schon von den alten Chinesen durch Verbrennung bestimmter Fette hergestellt worden. In der Tat war im Bereich der nanoskaligen Verfahren die Praxis der Theorie an vielen Stellen voraus. Eine gar nicht seltene Situation, die ähnlich auch in der Biotechnologie vorlag: Die Menschen wussten seit Jahrtausenden, wie man Bier braut oder Wein herstellt – jedoch erst im 19. Jahrhundert, mithilfe entwickelter Mikroskopietechnik, entdeckten sie, dass bei diesen Prozessen Mikroorganismen die Hauptrolle spielten. Erst damit war der Weg frei für ein systematisches Verständnis der „Gärungsprozesse“ und damit auch für die systematische Weiterentwicklung der Technologie, die bald zur Entstehung neuer Industrien führte. Ähnlich gestatten es neue Analyse- und Beobachtungsverfahren, in erster Linie wohl das Rastertunnelmikroskop, nanoskalige Prozesse genauer zu beobachten und zu verstehen, die vielleicht schon seit langem bekannt, jedoch bislang nicht richtig erkannt waren.

### STAUB ALS PHÄNOMEN

Was ist überhaupt Staub? Die älteste Definition stammt von Isidor von Sevilla (ca.560–636), dem heiligen Kirchenlehrer und (seit 2001) Patron des Internets. Sie findet sich in seinem *Etymologiarium*: „Pulvis dictus quod vi venti pellatur“, sagt er da im Kapitel über die Steine und die Metalle und beeilt sich gleich, eine Bibelstelle (Psalm 1,4) als Beleg anzugeben. Die Definition ist rein phänomenologisch: Staub ist das, was vom Wind bewegt werden kann. So lernten es die Studenten bis weit ins Mittelalter, denn das Werk des Isidor genoss jahrhundertlang höchste Autorität. Ein heutiger Leser wird möglicherweise mit der Definition Probleme haben. Denn natürlich können alle möglichen kleinen Teile vom Wind bewegt werden. Da Staub je nach Herkunft und je nach Bearbeitung sehr unterschiedlich ausfallen kann, liegt der Gedanke nahe, dass es „an sich“ überhaupt kei-



nen Staub gebe, Staub sei nur ein Sammelbegriff für sehr kleine Partikel. Natürlich haben die einzelnen Staubpartikel je nach Herkunft und Zusammensetzung unterschiedliche Eigenschaften. Doch alle diese Teilchen haben etwas Besonderes: Ihre Oberfläche ist nämlich sehr groß im Verhältnis zu ihrer Masse. Dieses Verhältnis bestimmt das Verhalten staubfeiner Teilchen so grundlegend, dass es berechtigt erscheint, sie alle mit dem summarischen Titel Staub anzusprechen. Denn die Größe eines Teilchens ist nicht etwas bloß Relatives. Sie hat vielmehr physikalische Bedeutung – große Teilchen verhalten sich grundsätzlich anders als sehr kleine, aus welchen Stoffen auch immer sie zusammengesetzt sein mögen. Der heilige Isidor mag es geahnt haben.

Das Zerkleinern einer Substanz in kleine und kleinste Partikel ist nicht nur ein mechanischer Vorgang, sondern verändert auch Eigenschaften des Stoffes. Diese Veränderungen gehen nicht soweit, dass geradezu eine Stoffumwandlung stattfindet. In vielen Fällen scheint es jedoch sinnvoll zu sein, von nanoskaligen Modifikationen eines Stoffes zu sprechen. Die Quantität erweist sich als Qualität, und zwar noch bevor diejenigen Größenordnungen erreicht sind, in denen die Gesetze der Quantenmechanik sich bemerkbar machen.

Als Analogie, um das Verhalten sehr kleiner Partikel zu verstehen, kann ein Vergleich der makroskopischen Welt mit dem Reich der Insekten dienen. Die in unserem Leben dominierende physikalische Kraft ist die Schwerkraft. Sie formt unsere Knochen, gibt das Volumen der Muskeln vor, leitet unsere Bewegungen, bestimmt über den Grundriss der Häuser und den Aufbau der Maschinen. Dies alles ändert sich bei den „winzigen“ Insekten. Im Gegensatz zu uns haben sie eine große Körperoberfläche im Vergleich zur Masse. In ihrer Welt muss sich die Schwerkraft den Oberflächenkräften unterordnen, die in unserer Welt eine weniger große Rolle spielen. Daher ist es möglich, dass Insekten problemlos an Wänden entlanggehen. Wenn ein Insekt aus großer Höhe herabfällt, landet es weich. Der Luftwiderstand dient ihm als Puffer. Die Oberflächenspannung des Wassers macht es möglich, dass Insekten darauf wie auf einer elastischen Membran gehen. Weil in der Insektenwelt die Oberfläche alles ist, sind auch die Organismen anders gebaut. Sie verfügen über andere Antriebssysteme und andere Stützsysteme. Nicht umsonst studieren Mikro- und Nanotechniker eher die winzigen Lebewesen als die großen, um auf neue Ideen für Mikrokonstruktionen zu kommen.

Zur Erforschung des Staubes haben fast alle Naturwissenschaften beigetragen, auch wenn die Physiker und die Chemiker oft der Meinung sind, dass alles Wesentliche von ihnen erkannt wurde. Jedoch ist gerade im Bereich der Erforschung des Verhaltens kleiner Partikel der Beitrag der Biologen entscheidend. Dass sich die Biologen für das Winzige interessieren, hängt damit zusammen, dass die bei weitem meisten Lebewesen kleiner als ein Millimeter sind. Es ist daher kein Zufall, dass zwei der wichtigsten nanoskaligen Phänomene von Biologen entdeckt wurden. Zum einen die Brownsche Bewegung, die von dem schottischen Botaniker Robert Brown (1773–1858) 1827 beim Mikroskopieren von Pollenkörnern entdeckt wurde. Dabei handelt es sich um die diskontinuierliche, „eckige“ Bewegung von Pollenkörnern oder anderen sehr kleinen Partikeln in der Luft oder im Wasser, die mit steigender Temperatur zunimmt und auf Atomstöße zurückgeführt werden kann. Ein weiterer Botaniker ist Wilhelm Barthlott (\*1946), der schon in den siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts den Lotos-Effekt entdeckte, jene nanoskalige Ausprägung von Oberflächenstrukturen, die dazu führt, dass bei der Lotospflanze und bei einigen anderen Pflanzen Wasser und Schmutz nicht an der Oberfläche haften, sondern abperlen.

Kann man von „der“ Staubbeforschung sprechen? In vielen Disziplinen wird über den Staub geforscht. Doch die Interessenrichtungen und auch die Methoden sind vielfältig. In manchen Zusammenhängen begegnet man einem Komplex, den ich als mikroarchäologisches Paradigma bezeichnen möchte. Ähnlich wie ein Archäologe aus einem Haufen von Splittern und Scherben, die er in einem bestimmten Umfeld und zu einer bestimmten Zeit gefunden hat, einen vergangenen Lebenszusammenhang oder gar eine ganze Epoche rekonstruiert, lesen Kriminalisten, Geographen oder Ökologen aus den an einem bestimmten Ort aufgefangenen Partikeln Geschichten heraus und rekonstruieren vergangene Zustände. Oft geht es also nicht um den Mikrokosmos an sich, sondern um seine Funktion als Spiegel des Makrokosmos.

### **STAUB UND KOSMOS – EIN PHILOSOPHISCHER TOPOS**

Ein schwebendes Teilchen, das man nur unter besonderen Lichtbedingungen, etwa wenn ein Lichtstrahl in ein sonst dunkles Zimmer fällt, erblickt, markiert die äußerste Grenze dessen, was gerade noch wahrnehmbar ist. Es hat keine klar erkennbare Gestalt, lässt sich kaum er-



tasten, erhebt sich beim leisesten Luftzug und segelt davon. Staub ist das labilste, unklarste und in gewisser Weise auch das niedrigste materielle Sein, das sich denken lässt. Staub ist ein Gemisch von ungewisser Herkunft, ein Bastard. Diese allgemein übliche Abwertung lädt natürlich ein zu einer Umkehrung. Tatsächlich setzen auch die meisten philosophischen Erörterungen des Staubes dieses kleinste und unwürdigste Sein in Beziehung zum größten und erhabensten: zum Weltall.

So lehrt eine Spekulation, die bereits angesprochen wurde, dass auch im Staubkorn, dem kleinsten kosmischen Sinnending, auf zusammengezogene Weise das All gespiegelt sei. Diese Idee hat eine lange Tradition, die auf Nikolaus Cusanus (1401–1464) zurückgeht. Für ihn hängt alles mit allem zusammen, alles ist mit allem verbunden, deshalb kann der augenblickliche Zustand der Welt abgelesen werden an jeder noch so kleinen Einzelheit in der Welt: *omnia in omnibus*. Noch Albert Einstein (1879–1955) steht in dieser Tradition, wenn er in einem berühmten Satz in einem Interview erklärt, dass einer, der das Geschehen in einem Sandkorn vollständig wissenschaftlich beherrscht, im selben Moment auch die allgemeinsten Gesetze des Universums erkannt habe. Denn das eine sei nur möglich auf Grundlage des anderen.

Beliebt ist auch die Vorstellung, dass im einzelnen Staubkorn Welten verborgen sind. Eine Idee, die vor allem, wie wir bereits sahen, Leibniz mit schönen Worten ausgemalt hat. Auch sein Briefpartner, der Basler Mathematiker Johann Bernoulli, sann den winzigen Welten gerne nach: „Weshalb hätte Gott nur die Art von Größen, die unsere Objekte ausmachen und unserem Verstand entsprechen erschaffen sollen – während sich doch leicht denken lässt, dass in dem kleinsten Stäubchen eine Welt existieren kann, in der alles dieser großen Welt entsprechend angeordnet ist, und dass umgekehrt unsere Welt nichts anderes ist, als ein Stäubchen einer anderen, unendlich größeren.“

Dass in diesem Motiv der Stoff für eine echte Story steckt, ist erst einem viel späteren Schriftsteller aufgefallen: Der britische Autor Terry Pratchett (\*1948) geht in seinem 1971 erschienenen Roman *The carpet people* von der Imagination einer Stadt aus, die sich irgendwo in einem Teppich befindet und nicht größer als ein Punkt ist. Was in dieser Stadt geschieht, ähnelt aber nicht allzu sehr jener besten aller möglichen Welten, an die Leibniz und manche seiner frommen Zeitgenossen gerne dachte. Vielmehr handelt es sich um eine Räuberpistole mit Krieg, Mord und Totschlag, in der auch der Staubsauger, als unwillkommene Verbindung von Mikro- und Makrowelt eine wichtige Rolle spielt.

Ein letztes Gedankenmotiv, das ich hier anführen möchte, geht aus von der Frage nach der Herkunft des Staubes. Staub, wo auch immer wir ihn finden, ist ein Gemisch. Wo kommen seine einzelnen Bestandteile her? Der Arzt, Philosoph und Magier Paracelsus (1493–1541) ist, soweit ich sehen kann, der erste, der dieses Motiv in einen kosmischen Zusammenhang stellt. Der Mensch, so sagt er in seiner *Astronomia Magna*, ist nach dem biblischen Bericht von Gott geschaffen worden, nachdem Himmel und Erde, Tiere und Pflanzen geschaffen wurden. Nachdem Gott die ganze übrige Welt kreiert hatte, erschuf er den Menschen aus Schmutz, Pulver und Staub: aus dem *limus terrae*. Wie versteht aber Paracelsus diesen *limus terrae*, diesen „Schmutz der Erde“?: „*limus terrae* ist ein auszug vom firmament und allen elementen, das ist (...) von allen corporibus und creatis.“ So sind alle Körper und alle Geschöpfe, Sterne und Elemente in das Material, aus dem der Mensch gemacht ist, eingegangen: „derselbige staub ist *limus terrae* und *limus terrae* ist *maior mundus*. Und also ist der mensch gemacht aus himel und erden, das ist aus den obern und undern geschöpfen.“ Das Material, aus dem Gott den Menschen schuf, ist kosmisch tingiert. Der Staub, der die ganze Schöpfung versteckt enthält, ist ein universaler Stoff. Daraus ergibt sich für Paracelsus, dass für ein Verständnis des Menschen nicht nur irdische, sondern auch kosmische Kompetenz erforderlich ist. Alles, auch die entferntesten Gestirne, kann einen Einfluss auf den Menschen haben. Deshalb muss sich der Arzt nicht nur mit Kräutern und Tieren, Mineralien und Elementen, sondern auch mit der Astronomie auskennen.

Über Paracelsus ist das Motiv des universalen Staubes, aus dem der Mensch gemacht ist, in die weit verzweigte alchemistische Literatur eingegangen – und erlosch vorerst mit dem Ende der Alchemie. Es tauchte aber, wie in einer magischen Auferstehung, bei einem Schriftsteller des 20. Jahrhunderts wieder auf: bei Ernesto Cardenal (\*1925). Immer wieder kommt der Dichter in seinen Psalmen und Gedichten auf den kosmischen Ursprung des Menschen zurück. So schreibt er im 37. Gesang seines *Cantico Cósmico*: „Aus dem Staub von Sternen gemacht, die explodierten, werden wir wieder Sterne und Planeten sein, einmal.“ Aus dem Staub, dem scheinbar niedrigsten aller materiellen Dinge, wird hier eine Brücke zum Weltall. Eine schöne Imagination! Die sogar in der modernen Astrophysik keineswegs von der Hand gewiesen wird. Denn nicht nur rieselt, wie in einem der folgenden Beiträge noch genauer dargelegt werden wird, beständig kosmischer



Staub auf die Erde nieder. Die ganze Erde kann als eine Station im kosmischen Materiekreislauf angesehen werden. Die Atome und Moleküle, aus denen unser Körper aufgebaut ist, existierten in der Geburtsstunde des Kosmos noch nicht, sondern sind erst im Laufe von Jahrmilliarden im Innern bestimmter Sterne wie in einem Backofen generiert worden. Diese Sterne explodierten dann, wie der Dichter schreibt und schleuderten jenen Staub und jene Trümmer ins Weltall, aus denen schließlich unser Sonnensystem und dann auch die Erde entstanden sind. So hat jener *limus terrae*, der Schmutz der Erde, den der Wind vor sich hertreibt, tatsächlich eine kosmische Herkunft.

#### LITERATUR

- AMBERGER-Lahrmann, Mechthild, Schmäh, Dietrich: Gifte. Geschichte der Toxikologie. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo 1988.
- GASTON Bachelard: Les Intuitions atomistiques – Essai de classification. Paris 1933, insb. S. 19–40: La Métaphysique De La PoussiÈre.
- Blome, Hans-Joachim und Harald Zaun: Der Urknall. Anfang und Zukunft des Universums. München 2004.
- BUCHER, Paul: Tiere als Mikrobenzüchter. Berlin, Göttingen, Heidelberg 1960.
- BÜTTNER, Jan Ulrich: Asbest in der Vormoderne. Vom Mythos zur Wissenschaft. Münster, New York, München, Berlin 2004.
- Cardenal, Ernesto: Cántico Cósmico. Madrid 2002.
- COMTOIS, Paul: John Tyndall and the floating matter of the air. In: *Aerobiologica* 17, 2001, S. 193–202.
- EHRENBERG, Chr. Gottfried: Passat – Staub und Blut – Regen. Ein großes unsichtbares Wirken und Leben in der Atmosphäre. Berlin 1849.
- GERDES, Paulus: Ethnogeometrie. Kulturanthropologische Beiträge zur Genese und Didaktik der Geometrie. Bad Salzdetfurth 1990.
- HEIDER, Fritz: Ding und Medium. In: *Symposion* Bd. 1. Berlin 1927.
- Isidori Hispalensis Episcopi Etymologiarum Sive Originum, Tomus I–II, Oxford University Press, London 1966.
- JÜTHNER: Artikel KONIS (Staub) in: *Paulys Realencyclopädie der Klassischen Altertumswissenschaft*. Neue Bearbeitung begonnen von Georg Wissowa. Unter Mitwirkung zahlreicher Fachgenossen herausgegeben von Wilhelm Kroll. 22. Halbband. Stuttgart 1922, Sp. 1312–1315.

- LESZTRE, Henri: POUSSÉRE (Staub) in: F. Vigouroux: Dictionnaire De La Bible. Paris 1912, Sp. 588–591.
- MCNEILL, John R.: Blue Planet. Die Geschichte der Umwelt im 20. Jahrhundert. Frankfurt am Main, Zürich, Wien 2003 (Originalausgabe 2000).
- LUTHER, Wolfgang (Hg.): Technological Analysis. Industrial Application of Nanomaterials – Chances and Risks. Düsseldorf 2004.
- LEIBNIZ, Gottfried Wilhelm: Hauptschriften zur Grundlegung der Philosophie. Herausgegeben von Ernst Cassirer, Bd. II. Hamburg 1906.
- OSTWALD, Wolfgang: Die Welt der vernachlässigten Dimensionen – eine Einführung in die moderne Kolloidchemie. Dresden u. Leipzig 1922.
- PARACELUS (Theophrast von Hohenheim): Astronomia Magna oder Die ganze Philosophia sagax der großen und kleinen Welt. 1537/38. Theophrast von Hohenheim, gen. Paracelsus Sämtliche Werke, Bd. 12. München u. Berlin 1929.
- SCHALLER, Friedrich: Die Unterwelt des Tierreiches. Kleine Biologie der Bodentiere. Berlin, Göttingen, Heidelberg 1962.
- TYNDALL, John: Staub und Krankheit. In: Ders.: Fragmente aus den Naturwissenschaften. Braunschweig 1874, S. 282–402.

## ABBILDUNGEN

Die Abbildungen sind entnommen dem Werk von Chr. Gottfried Ehrenberg: Passat – Staub und Blut – Regen. Ein großes unsichtbares Wirken und Leben in der Atmosphäre (Berlin 1849). Sie zeigen Mikroskopansichten von Staubproben, die Ehrenberg von Naturforschern und Reisenden aus aller Welt zugesandt wurden. Ehrenberg hat die Proben mikroskopiert und gezeichnet; seine Vorlagen wurden anschließend gestochen. Ehrenbergs Buch markiert den Anfang der naturwissenschaftlichen Staubbeforschung.

MANFRED EULER

## TANZENDE STAUBKÖRNER UND NANOMASCHINEN

### EIN AUSFLUG IN DIE WELT DES KLEINEN

*Aber die Maschinen der Natur, d.h. die lebendigen Körper, sind  
noch Maschinen in ihren kleinsten Teilen bis ins Unendliche.*

*G.W. Leibniz, Monadologie § 64*

Im Alltag sehen wir im Staub vor allem ein Ärgernis: graues, inertes und passiv wirkendes Material, das uns stört. So tot und unbeweglich, wie der Staub vielleicht oberflächlich erscheinen mag, ist er jedoch keineswegs. Unter dem Titel „Sonnenstäubchen“ schildert der römische Dichter und Philosoph Lukrez eine Erscheinung, die zeigt, dass es auch in der Welt des Staubes sehr dynamisch zugeht. In einem Sonnenstrahl, der in ein abgedunkeltes Zimmer fällt, werden Staubeilchen sichtbar. Sie führen einen geheimnisvollen Tanz aus, der nie aufzuhören scheint. Die Staubeilchen, von unsichtbaren Stößen kleinerer Atome getrieben, werden in alle möglichen Richtungen gelenkt.

Für den Dichter-Philosophen offenbart ihre immerwährende Bewegung ein verborgenes Weben von Kräften, welches die Materie durchdringt – Kern aller Wandlungsprozesse. Der Tanz der Staubeilchen ist Ausdruck einer schöpferischen Kraft, die sich in den großen Dingen ebenso äußert wie im Kleinen. Bewegungen und Stöße, so die Vorstellung von Lukrez, pflanzen sich vom Mikrokosmos in den Makrokosmos fort und verbinden die Welt der kleinen Teilchen mit der sinnlich wahrnehmbaren Welt.

Die tanzenden Staubpartikel sind ein Beispiel für dynamische Prozesse im Mikrokosmos, die uns normalerweise verborgen bleiben. In den folgenden Abschnitten begeben wir uns auf eine Reise in diese geheimnisvolle Mikrowelt, die den unsichtbaren Untergrund unseres Daseins bildet und die voller Überraschungen ist. Unser Ziel ist es, die

Eigenschaften und die in kleinen Systemen ablaufenden Prozesse besser zu verstehen und systematisch zu untersuchen, wie diese mit der makroskopischen Welt zusammenhängen. Die gewonnenen Erkenntnisse bieten einerseits ein großes Potenzial für technologische Innovationen. Andererseits tragen sie zu einem gewandelten Selbstverständnis bei: Sie lassen uns die gewohnte Alltagswelt und uns selbst in einem anderen Licht sehen.

### **STAUBKÖRNER UND BIOLOGISCHE ZELLEN**

Die unserer alltäglichen Makrowelt angepasste Längeneinheit ist das Meter (m). Unsere eigene Körpergröße lässt sich bequem in Metern ausdrücken, beispielsweise 1,80 m. Kilometer (1 km entspricht 1000 m) und Millimeter (1 mm entspricht 0,001 m) sind ebenfalls noch gut vertraute Größenordnungen der Länge. Unsere Alltagswelt ist mit Mikrowelten verbunden, die unseren Sinnen nicht direkt zugänglich sind. Staubpartikel, wie etwa Gräserpollen, die Heuschnupfen verursachen, sind so klein, dass wir sie mit bloßem Auge nicht mehr sehen können. Um sie sichtbar zu machen, benötigen wir ein Mikroskop. Die unmittelbare Beobachtung der Sonnenstäubchen durch Lukrez wird möglich, weil die kleinen Partikel vor einem dunklen Untergrund so das Licht streuen, dass sie als leuchtende Punkte sichtbar werden. Unter diesen günstigen Umständen ist man nicht auf besondere Hilfsmittel für die Beobachtung angewiesen.

Die für Staub charakteristische Größenordnung, die mit dem Mikroskop erschlossen werden kann, ist der Mikrometer-Bereich. Ein Mikrometer entspricht 0,000001 Metern – also ein Millionstel Meter! Nur die größten Staubpartikel sind mit bloßem Auge sichtbar (ca. 100 Mikrometer). Noch kleinere Staubteilchen sind auch in dem Lichtmikroskop nicht mehr zu erkennen. Sie messen einige zehn bis hundert Nanometer. Ein Nanometer ist ein Milliardstel Meter (1000 Nanometer = 1 Mikrometer). Auf der Nanometer-Skala werden atomare Abmessungen erreicht: Je nach Element kann man auf einem Nanometer ungefähr zehn Atome aneinander reihen.

Wir selbst bestehen aus kleinsten biologischen Einheiten, den Körperzellen. Ihre Abmessungen betragen meist nur wenige Mikrometer. Ihre Zahl ist dagegen kaum vorstellbar groß: Rund  $10^{14}$  oder Hunderttausend Milliarden Zellen wirken in unserem Körper zusammen. Staubpartikel und biologische Zellen sind also von ähn-

licher Größe. Beide sind Akteure in der für uns weitgehend unsichtbaren Mikrowelt. Staubkörner sind nur imstande, passiv zu reagieren, so wie die Sonnenstäubchen durch Luftwirbel zu ihrem Tanz angetrieben werden. Im Gegensatz dazu stellen lebende Zellen aktive Systeme dar. Sie sind in der Lage, autonom aus sich heraus zu agieren. Trotz der geringen Größe sind sie unglaublich leistungsfähig und können sich auf vielfältige Tätigkeiten spezialisieren: Sie wandeln Energie, produzieren Bausteine und Signalstoffe für den Körper, erzeugen und leiten elektrische und chemische Signale, kommunizieren mit ihren Nachbarn und entfernten Partnern und sind sogar in der Lage, sich selbst zu reparieren und zu vermehren.

Fasst man, wie es Leibniz getan hat, biologische Organismen als Maschinen auf, so handelt es sich für menschliche Maßstäbe dabei um ganz besondere Maschinensysteme: Lebewesen sind bis in ihre kleinsten Teile hinein „maschinenartig“. Organsysteme, Organe, Bestandteile von Organen, Zellen und Zellbestandteile wirken über unterschiedliche Größenordnungen hinweg sinnvoll zusammen. Jedes Teil spiegelt die Funktion des Ganzen und ist wiederum aus Teilen zusammengesetzt, die ebenso sinnvoll kooperieren. Bislang erfüllen die vom Menschen gemachten Maschinen im wesentlichen nur auf einer Ebene die ihnen zugedachte Funktion. Ein Zahnrad besteht nicht aus vielen kleinen Zahnrädern; ein Motor ist nicht aus vielen kleineren Motoren aufgebaut, usw. Diese Einschränkung könnte sich in der Zukunft grundlegend ändern, denn menschliche Technik ist imstande, Materie auf der Mikrometer-Skala und in ersten Ansätzen auch auf der Nanometer-Skala zu strukturieren.

### INTELLIGENTER STAUB

Während die technologische Entwicklung in der Vergangenheit auf die Beherrschung der Materie im Großen gesetzt hat, spielt sich der Fortschritt unserer Zeit dagegen immer mehr im Kleinen und ganz Kleinen ab. Er nutzt Strukturen und schafft Systeme in der Größenordnung von Staubteilchen oder biologischen Zellen. Trotz ihrer Winzigkeit können diese kleinen und kleinsten Strukturen höchst verlässlich außerordentlich komplexe Funktionen ausüben. Solche Mikro- und noch kleinere Nanomaschinen, die auf molekularer Ebene arbeiten, könnten unsere technische Welt künftig noch grundlegender verändern als wir es von den technologischen Revolutionen der Vergangenheit kennen.

Die Verwendung von Komponenten, Systemen und Werkzeugen, die auf derart technologisch gewandeltem „intelligentem“ Staub basieren, führen bereits heute zu tief greifenden kulturellen Wandlungsprozessen. Unsere Informations- und die noch auszugestaltende Wissensgesellschaft basiert ganz wesentlich auf technologischen Fortschritten auf der Mikro- und Nanometer-Skala. Wer die Entwicklung im Großen vorantreiben will, muss auf die kreative Gestaltung und technologische Nutzung des Kleinen und Kleinsten setzen. Auch die Umweltverträglichkeit und die nachhaltige Nutzung von Technologien kann durch dieses Wissen ganz entscheidend gefördert werden.

Am weitesten ist die Miniaturisierung der Elektronik fortgeschritten: Bei den Abmessungen einzelner Funktionseinheiten, wie z.B. Speicherzellen oder Schalter (Transistoren), erreicht man derzeit ca. 50 Nanometer. Atomare Größenordnungen, die weiteren Verkleinerungen dieser Technologie ein Ende setzen, sind bald erreicht. Die Entwicklung der Mikroelektronik zeigt beispielhaft, wie durch fortgesetzte Verkleinerung erschwingliche, zunehmend leistungsfähige und vielfältig einsetzbare Systeme verfügbar werden (z.B. Handys, Rechner, Informationsnetzwerke). Diese neuen Werkzeuge der Informations- und Kommunikationstechnologie verändern Arbeitswelt, Kulturtechniken und unser Freizeitverhalten.

Es ergeben sich insbesondere aus der Integration verschiedener Mikrotechnologien neue Möglichkeiten. Die Mikrosystemtechnik vereinigt Komponenten aus der Elektronik, der Mechanik, der Optik und der Fluidik zu Systemen, die vielfältige Aufgaben erfüllen: Genauer als unsere Sinnesorgane können Mikrosensoren Temperatur, Licht, Schall, Kräfte, Drucke und chemische Substanzen messen. Ähnlich unseren Muskeln sind Mikrosysteme in der Lage, elektrische Signale in Kräfte umzusetzen und für Bewegung zu sorgen. Durch Integration entstehen winzige adaptive Systeme, die ihre Umwelt wahrnehmen und geeignet darauf reagieren können. Die Vielfalt und Leistungsfähigkeit technischer Mikrosysteme ist angesichts ihrer Winzigkeit beeindruckend. Dennoch sind die technischen Artefakte jenen natürlichen Systemen wie biologischen Zellen noch weit unterlegen. Es wird vermutlich noch lange Zeit dauern, bis Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in der Lage sein werden, die Funktionsvielfalt lebender Strukturen technisch nachzubauen.

### WIE IST ES, EIN STAUBTEILCHEN ZU SEIN?

Wie kann man die Eigenschaften solcher Mikromaschinen in der Größe von Staubpartikeln verstehen? Sind diese nur verkleinerte Abbilder dessen, was uns im Großen begegnet, oder müssen wir mit neuen Erscheinungen rechnen, wenn wir in die Welt kleiner und kleinster Teilchen hinabsteigen? Inwieweit kann man Erfahrungen aus der Alltagswelt in diesen Bereich übertragen? Wir begeben uns dazu auf eine phantastische Reise, indem wir uns in Gedanken allmählich auf Staubkorngröße verkleinern. Die Idee, in den unsichtbaren Untergrund und in die Welten des ganz Kleinen zu reisen, hat die Phantasie der Menschheit zu allen Zeiten beflügelt. Wer hat nicht als Kind sich den Tagträumen hingegeben, in die Miniwelt seiner Spielzeuge einzutauchen?

Im Kino und Fernsehen stößt man immer wieder auf Variationen dieses alten Themas. Kinder werden (versehentlich) geschrumpft. Mini-U-Boote tauchen in die Blutbahn eines Menschen ein. Die entsprechend verkleinerten Besatzungen bestehen dort allerlei Abenteuer, wie in Steven Spielbergs Film „Reise ins Ich“ aus dem Jahr 1987. Sind derartige Utopien von Mikrowelten nur Fiktionen, die weit von der Wirklichkeit entfernt sind? Oder ist die Idee gar nicht so abwegig, winzige Roboter über unsere Adern in den Körper einzuschleusen, um Untersuchungen oder mikrochirurgische Eingriffe vorzunehmen?

Wie immer gehen Fantasien und Visionen der tatsächlichen Entwicklung weit voraus. Ähnlich der künstlerischen Aktivität basieren Wissenschaft und Technik auf Kreativität, Fantasie und visionärer Begabung. Doch anders als in der künstlerischen Fiktion muss die Wissenschaft ihre Modelle mit den Randbedingungen und Gesetzen der Wirklichkeit in Einklang bringen. In dieser Hinsicht kann man viel von Reisen in Mikrowelten lernen. Wir betrachten beispielhaft das Urbild solcher fiktionalen Ausflüge, den utopisch-satirischen Reiseroman „Gullivers Reisen“ von Jonathan Swift. Bei seinem unfreiwilligen Besuch in Liliput trifft Gulliver auf Miniwesen, Abbilder des Menschen, die exakt auf den Maßstab 1:12 verkleinert sind. Der Schriftsteller hat keine Mühe, Zwergen- sowie Riesenreiche zu ersinnen, in denen die Lebewesen sich nur durch einen Maßstabsfaktor von unserer Welt unterscheiden.

Bei diesem Gedanken bezieht sich Swift auf die Erkenntnistheorie von Bischof Berkeley, den er durch Gulliver mit den Worten zitieren lässt: „Zweifellos haben die Philosophen recht, wenn sie uns sa-

gen, dass alles nur durch den Vergleich groß oder klein ist.“ Im übertragenen Sinne demonstriert der Roman mit dem Kunstgriff der Größentransformation die Relativität menschlicher Werte und stellt die Kategorie des Normalen für das menschliche Zusammenleben in Frage. Berkeleys Bemerkung ist richtig, was die Willkür der Maßstabswahl angeht. Sie wird falsch, wenn man unterstellt, alles ließe sich beliebig vergrößern und verkleinern. Jenseits allen Relativismus gibt es absolute Maßstäbe und absolute Grenzen, die aus physikalischen Gesetzen folgen. Diese Einsicht hat wichtige Konsequenzen für unsere Reise in die Mikrowelten der Staubeilchen.

### VON ZWERGEN, RIESEN UND IHREM ENERGIEBEDARF

Swift ist bemüht, die Verkleinerung um den Faktor 12 so genau und konsequent wie möglich durchzuführen. Liliputaner sind ca. 6 Zoll (15 cm) groß und alle anderen Wesen, die in Liliput leben, sind exakt im gleichen Verhältnis (proportional) verkleinert (Abb. 1). In einem Vertrag wird geregelt, dass Gulliver für seine Dienste Speise und Trank erhält, die zur täglichen Ernährung von 1728 Liliputanern ausreichen würde. Wie kommt es zu dieser Zahl? Man erklärt dem erstaunten Gulliver, die Mathematiker hätten die Höhe seines Körpers gemessen und herausgefunden, dass er im Verhältnis 12:1 größer als die Liliputaner sei. Aus der Ähnlichkeit des Körperbaus habe man den Schluss gezogen, dass sein Körper mindestens 1728 ( $=12 \times 12 \times 12 = 12^3$ ) der ihren enthalten müsse und folglich ebenso viel Nahrung benötige, wie zum Lebensunterhalt für diese Anzahl Liliputaner erforderlich sei. Diese naive Umrechnung hat ihre Tücken! Die Mathematiker aus Liliput haben ihre Rechnung ohne die Physik und die Biologie gemacht.

Mit einer einfachen Überlegung kann man nachvollziehen, dass Gulliver mit dieser Nahrungszufuhr hoffnungslos um mehr als das Zehnfache überfüttert wird. Jedes warmblütige Lebewesen gibt ständig Wärme über die äußeren und inneren Oberflächen (Haut, Lunge) an die Umgebung ab. Daher kann man vernünftigerweise annehmen, dass die pro Tag abgegebene Energiemenge um so größer ist, je größer die Oberfläche des Lebewesens ist. Energie wird dagegen im Volumen erzeugt. Die produzierte Energiemenge wächst daher im gleichen Verhältnis (also proportional) zu dem Volumen bzw. zu der Masse an. Es wird sich ein Gleichgewicht einstellen, das vom Oberflächen-Volumen-Verhältnis abhängt.





Abb. 1: Liliputaner sind ca. 6 Zoll groß (~15 cm). Entsprechend sind alle Lebewesen der Liliput-Welt um den Faktor 12 proportional verkleinert.

Nähern wir vereinfachend die Form von Lebewesen durch eine Kugel an. Dann wächst die Oberfläche entsprechend dem Quadrat des Radius an ( $O \propto r^2$ , das Zeichen  $\propto$  bedeutet proportional). Die Masse wächst dagegen mit der dritten Potenz an ( $m \propto r^3$ ). Gullivers Masse ist  $12^3$  mal größer als die der Liliputaner, seine Oberfläche übersteigt jedoch die der Liliputaner nur um den Faktor  $12 \times 12 = 12^2$ . Folglich sollte er nach dieser Überlegung nur die 144-fache Tagesration der Liliputaner erhalten! Unter diesen Annahmen lässt sich die in Ruhe vom Organismus pro Zeiteinheit umgesetzte Energie (Grundumsatz  $P$ ) in Abhängigkeit von der Körpermasse ermitteln.  $P$  wächst proportional zur Oberfläche an:  $P \propto r^2$ . Ersetzt man darin  $r$  durch die Körpermasse ( $m \propto r^3$  bzw.  $r \propto m^{1/3}$ ) dann ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$P \propto m^{2/3}$$

Die Liliput-Mathematiker haben dagegen angenommen, dass Gullivers Grundumsatz proportional zum Volumen und damit auch zur Körpermasse anwächst:

$$P \propto m^1$$

Anders als bei deren Rechnung ergibt sich ein Potenzgesetz mit einem Exponenten, der kleiner als 1 ist. Der gebrochene Exponent  $2/3$  drückt das Oberflächen-Volumen-Verhältnis aus. Mit zunehmender Größe steigt der Grundumsatz immer langsamer an. Die tatsächlich gemessene Wärmeproduktion von Warmblütern bestätigt ungefähr dieses einfache Modell (Abb. 2). Allerdings deuten die Messungen auf einen etwas größeren Exponenten im Potenzgesetz, der ungefähr bei  $3/4$  liegt:

$$P \propto m^{3/4}$$

Grund für diese Abweichung ist die Tatsache, dass die äußeren und inneren Oberflächen von Lebewesen komplizierter als eine Kugel mit konstantem Radius geformt sind. Das ändert aber nichts an der grundsätzlichen Konsequenz des Potenzgesetzes mit einem Exponenten kleiner als 1. Kleine Lebewesen müssen relativ (viel) mehr Nahrung als große Lebewesen aufnehmen. Die Größe von warmblütigen Lebewesen besitzt eine absolute Grenze nach unten. Spätestens dann, wenn kleine Lebewesen durch ihr ungünstiges Oberflächen-Volumen-Verhältnis dauernd essen müssten, um sich am Leben zu erhalten, ist die absolute Grenze der „Miniaturisierung“ von Lebewesen erreicht. Tatsächlich sind Zwergspitzmäuse die kleinsten Warmblüter. Sie müssen täglich rund ein Viertel ihrer Gesamtmasse an Nahrung zu sich nehmen. Große Tiere haben das umgekehrte Problem, die bei körperlicher Belastung erzeugte Wärme wieder abzugeben.

Dass Riesen nicht in den Himmel wachsen können hat allerdings auch noch andere Gründe, wie z.B. die Tragfähigkeit des Skeletts. Die Belastung von Knochen hängt bei gegebener Kraft von der Querschnittsfläche ab. Knochen von größeren Lebewesen werden daher im Verhältnis immer dicker. Je schwerer ein Tier wird, desto höher ist der Anteil des Skeletts an seiner Gesamtmasse. Da Tiere nicht nur aus Skelett bestehen können, sind folglich dem Größenwachstum Grenzen gesetzt. Bei kleinen Tieren (z.B. Insekten) ist es zweckmäßiger, kein inneres Skelett zu entwickeln, sondern eine äußere Tragschale. Bei gleichem Materialaufwand besitzt diese aufgrund ihrer Form und des nach Außen verlagerten Materials eine höhere Festigkeit. Während dieses Konstruktionsprinzip im Kleinen höchst erfolgreich ist, versagt es im Großen (jenseits einiger 10 cm gibt es keine Insekten!). Abgesehen davon, dass ein äußerer Panzer nur schwer mitwachsen

kann (Häutungs- und Verpuppungsproblem), führt eine undurchdringliche äußere Schale wiederum zu Engpässen im Stoff- und Wärmeaustausch mit der Umgebung.

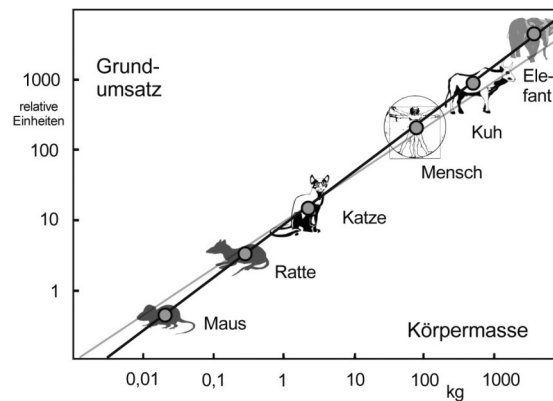


Abb. 2: Die Maus-Elefant Kurve. Die vom Stoffwechsel in Ruhe umgesetzte Energie hängt von der Körpermasse nach einem Potenzgesetz ab, dessen Exponent ungefähr  $3/4$  beträgt (dicke schwarze Linie). Die graue Linie gilt für einen Exponenten von  $2/3$ .

## MASCHINEN IN DER MASCHINE: VON TECHNISCHEN UND MOLEKULAREN MOTOREN

Gullivers Energiebedarf hat vor Augen geführt, dass im Kleinen einiges nicht so funktioniert wie im Großen. Man darf Systeme nicht proportional verkleinern, sondern muss passende Transformationen (Skalengesetze) kennen, um die Systeme funktionsfähig zu erhalten und zu optimieren. Die Konsequenzen der Größentransformation sind keinesfalls im Sinne eines „geht nicht“ zu verstehen. Vieles geht, jedoch auf eine andere Weise; manches funktioniert sogar besser. Das zeigt folgendes Beispiel: Das Oberflächen-Volumen-Verhältnis, das für eine zu starke Verkleinerung von Warmblütern hinderlich ist, erweist sich für technische Mikrosysteme als vorteilhaft. Mikromotoren können auf ihre Masse bezogen größere Leistungen entwickeln. Die unvermeidliche Verlustwärme, die im Betrieb produziert wird, kann durch die im Vergleich zum Volumen größere Oberfläche besser abgeführt werden.

Obwohl Mikromotoren (Abb. 3) wie Antriebe für Spielzeuge aussehen, sind sie alles andere als technische Spielerei. Ihre mögliche Einsatzfelder eröffnen völlig neue Perspektiven beispielsweise im medizinischen Bereich: Mini-Roboter, die kleine Eingriffe etwa in

Gefäßen vornehmen, werden durch winzige Antriebsaggregate und Werkzeuge möglich. Bereits jetzt gibt es Mini-Pumpen im Durchmesser eines Bleistifts, die bei Herzoperationen in die Herzkammern eingeführt werden. Sie sind in der Lage, die Pumpleistung des Herzens während des Eingriffs zu übernehmen.



Abb. 3: Elektrischer Mikromotor mit Getriebe (© Faulhaber).

Auch wenn der gezeigte Mikromotor eine enorme technologische Leistung darstellt, so ist er im Wesentlichen doch „nur“ eine verkleinerte Version eines gewohnten großen Motors. Biologische „Motoren“ funktionieren dagegen ganz anders. Entsprechend der Leibniz'schen Vorstellung von den „Maschinen in der Maschine“ wirken sie bis hinab auf die molekulare Ebene. Die Wirkung von Muskeln basiert auf der Längenänderung von Muskelfasern, die sich unter Energieaufwand zusammenziehen und entspannen können. Diese Funktion existiert bis in den molekularen Bereich hinein. Molekulare „Nanomaschinen“, die kontraktilen Proteine, arbeiten Linearmotoren vergleichbar, die sich nur entlang einer Raumachse bewegen. Sie setzen chemische Energie über molekulare „Greifbewegungen“ entlang von Molekülfäden in Längenänderungen um. Die gekoppelten Aktionen einer Unzahl kleiner molekularer motorischer Einheiten bewirkt eine Bewegung im Großen.

### IN DAS KLEINE HINEINHORCHEN: KLÄNGE AUS DER MIKROWELT

Neben dem Energieaustausch stellt der Informationsaustausch mit Mikrowelten einen weiteren Problemkreis dar, der Grenzen setzt, wenn man das aus dem Alltag Gewohnte nur proportional verkleinern will. Das gilt für das Hören ebenso wie für das Sehen. Jonathan Swifts Held Gulliver ist höchst sprachbegabt. Ihm gelingt es, so der Roman, binnen weniger Wochen die Liliputanersprache zu erlernen.

Wie würde sich ein solcher Zwerg anhören, wenn wir annehmen, dass die Sprache ebenso wie bei uns produziert wird?

Im Roman kann Gulliver problemlos kommunizieren, doch faktisch wäre es ihm unmöglich zu verstehen, was die Minimenschen sagen. Auch das lässt sich mit einer Größentransformation einsehen, welche die Längenskala und die Tonhöhenskala miteinander verbindet. Sprache basiert auf den Schwingungen der Stimmbänder und dem Mitschwingen (Resonanz) von Hohlräumen. Wir wissen aus der musikalischen Erfahrung, dass die wahrgenommene Tonhöhe schwingender Saiten oder Luftsäulen von deren Länge abhängt. Halbiert man die Länge einer Saite oder einer Orgelpfeife, dann erklingt die Oktave. Die Schwingungen des entstehenden Tons laufen doppelt so schnell ab; eine Halbierung der Länge bewirkt eine Verdopplung der Frequenz. Bei einer Verkleinerung der geometrischen Abmessungen um den Liliputaner-Faktor 12 werden die Frequenzen um den gleichen Faktor vergrößert.

Der menschliche Sprachbereich umfasst Frequenzen von 100 Hz bis 10 kHz. Die Frequenzeinheit 1 Hz (Hertz) bedeutet eine Schwingung pro Sekunde (1 kHz = 1000 Hz). Die Sprache der Liliputaner sollte daher den Frequenzbereich von 1,2 kHz bis 120 kHz umfassen. Das meiste davon ist für uns unhörbar; junge Menschen nehmen noch Schallsignale bis hinauf zu einer Frequenz von 15–20 kHz wahr. Gulliver kann somit bis zu ca. 15 kHz einiges von dem, was die Liliputaner sagen, tatsächlich hören. Es wird wie Mäusepfeifen klingen. Doch Gullivers Gehirn ist absolut nicht in der Lage, diese höherfrequenten Signale sprachlich zu deuten. Das menschliche Nervensystem nutzt bei der Sprach- und Musikwahrnehmung die Tatsache, dass sich Schallwellenmuster periodisch wiederholen. Diese Periodizität wird von den Hörnerven zum Hörzentrum in der Hirnrinde übertragen. Die Dichte der Nervenimpulse wird dazu entsprechend moduliert (dies bezeichnet man als das Periodizitätsprinzip des Hörens).

Diese Repräsentation von Sprach- oder Musiksignalen als zeitliche Muster ist nur für Frequenzen unter 1 kHz möglich. Darüber können die relativ langsamen Nervensignale dem Muster der Schallsignale nicht mehr folgen. Mit dem fehlenden Periodizitätsprinzip bricht ein wesentlicher Kanal der inneren Repräsentation und Verarbeitung von Sprachsignalen zusammen. Gulliver kann die Satzmelodie der Liliputaner-Sprache zwar hören. Da er die Periodizität des Schalls nicht auswerten kann, ist er aber nicht in der Lage, den Sinn der gesproche-

nen Worte zu verstehen. Die inneren Uhren in Gullivers Gehirn, die Impulse seiner Nerven, ticken nicht schnell genug, um die akustischen Muster in ihrer Zeitstruktur nachzubilden. Mit der heutigen Computertechnik wäre es ihm allerdings ein Leichtes, diese Frequenzen um einen Faktor 12 nach unten zu transformieren und somit verstehbar zu machen. Die akustische Kommunikationsbarriere ließe sich mit technischen Mitteln umgehen.

Wie weit die Technik die Prozesse der Mikrostrukturierung und damit auch die Klänge im Kleinen beherrscht zeigt das Beispiel der kleinsten Gitarre der Welt mit einer Größe von nur 10 Mikrometern. Sie ist durch Herausätzen aus einem Siliziumchip entstanden, nachdem man vorher lithographisch über eine Art Drucktechnik geeignete Masken auf das Material aufgebracht hat. Die Mikrogitarre ist eigentlich eine Spielerei, doch sie demonstriert die Leistungsfähigkeit der Mikrosystemtechnik und den Stand der Kunst, kleine Systeme durch den Einsatz makroskopischer Verfahrensschritte herzustellen. Die Saiten, deren Durchmesser 50 Nanometer beträgt, müssen zum Spielen mit Laserlicht angeregt werden. Sie schwingen mit Frequenzen von 10–40 Megahertz (Millionen Schwingungen pro Sekunde). Ihre Klänge liegen rund 16–18 Oktaven über dem üblichen Musikbereich.

#### **GRENZEN DER SICHTBARKEIT: DIE MIKROSTRUKTUR VON LICHT**

Beim Sehen treten mit zunehmender Verkleinerung des optischen Systems Probleme der Güte der Abbildung auf. Sie sind prinzipieller Natur und liegen im Wesen des Lichts begründet. Mit bloßem Auge erkennen wir gerade noch Millimeterbruchteile oder die sprichwörtliche Breite eines Haares, das in Armeslänge entfernt ist. Mit Lichtmikroskopen erzielt man durch Ausnutzen aller optischen Tricks eine rund 1200-fache Vergrößerung; so kann man Strukturen im Bereich von 0,1 Mikrometern gerade noch erkennen. Eine weitere Steigerung ist mit sichtbarem Licht prinzipiell nicht möglich. Wie kommt das?

Licht breitet sich geradlinig aus! – Zumindest kommen wir in der Alltagswelt gut mit dieser Vorstellung zurecht. Bei der Konstruktion von Bildern an optischen Linsen benutzt man im Physikunterricht gerade, mit dem Lineal gezogene Linien. Sie stellen Lichtstrahlen dar, die mathematische Idealisierung dessen, was man beobachtet, wenn man ein Lichtbündel durch Blenden immer weiter eingrenzt. Durch Konstruktionen mit solchermaßen idealisierten Lichtstrahlen lassen sich Bilder theoretisch beliebig stark vergrößern und verkleinern.

Mit den Prinzipien der geometrischen Optik kann man auch das Bild auf der Netzhaut des Auges konstruieren, dessen Größe von dem Abstand zum abgebildeten Gegenstand abhängt. Diese Abhängigkeit liegt auch der eingangs erwähnten Berkeley'schen Äußerung zugrunde, nach der alle Größe relativ ist.

Diese mathematische Konstruktion versagt allerdings, wenn man versucht, noch genauer hinzuschauen. Der Lichtstrahl ist eine mathematische Idealisierung, ein Modell, welches die Natur nur angenähert beschreibt. Versucht man tatsächlich, Lichtbündel durch Blenden immer weiter einzuengen, dann äußert sich mit zunehmender Verkleinerung immer mehr die „innere Struktur“ des Lichts, die eine solche Einengung unmöglich macht. Die Größenordnung, bei der diese Effekte deutlich sichtbar werden, liegen im Bereich von Mikrometern, also bei der typischen Längenskala von Staubeilchen. Dieses Innenleben von Licht bleibt im Alltag unbemerkt, doch es lässt sich beinahe „mit Händen greifen“, wie ein kleines Experiment zeigt, das man mit wenig Bastelaufwand selbst durchführen kann.

Laser sind so konstruiert, dass sie relativ eng begrenzte einfarbige Lichtstrahlen aussenden. Mini-Laser in Laser-Pointern sind ein preiswertes Abfallprodukt der optoelektronischen Mikrosystemtechnik. Mit einem Laser-Pointer kann man sehr schön in staubiger Luft das eng begrenzte Strahlenbündel beobachten und das Tanzen der Staubeilchen, das Lukrez so fasziniert hat. Der Durchmesser des Laser-Strahles ist kleiner als 0,5 mm. Was geschieht, wenn man diesen noch feiner machen will? Dazu klebe man zwei Rasierklingen so auf eine Pappscheibe, dass ihre Schneiden einen Spalt bilden. Verkantet man eine der Klingen ein wenig, so erhält man einen Spalt mit veränderlicher Breite. Man leuchte mit einem Laser-Pointer durch den Spalt auf eine mehrere Meter entfernte Wand.

Wenn man die Spaltbreite verkleinert, dann wird zunächst das Lichtbündel des Lasers ebenfalls schmaler. Mit zunehmender Einengung bemerkt man an den Rändern helle und dunkle Punkte. Diese wandern bei zunehmender Verkleinerung des Spalts nach außen. Das Helligkeitsmaximum im Zentrum wird dabei immer breiter und der Abstand zwischen den hellen und dunklen Streifen nimmt zu. Kurz bevor der Spalt vollständig schließt, wird das Lichtbündel auf der Wand weit aufgefächert. Diese Aufweitung des Lichtbündels bei zunehmender Einengung durch den Spalt ist ein unerwartetes Ergebnis, das im Rahmen der Strahlenoptik nicht verstanden werden kann.

Das Ausbreiten des Lichts in den Schattenraum heißt Beugung. Dieses seltsame Verhalten von Licht lässt sich im Wellenmodell leicht deuten. Wasserwellen breiten sich in den Schattenraum hinter einem Hindernis aus. Lässt man die anlaufende Wellenfront nur durch einen schmalen Spalt passieren, dann gehen von diesem halbkreisförmige Wellensysteme aus, die sich in den gesamten Halbraum hinter dem Spalt ausbreiten. Das Wellenmuster eines Spalts endlicher Breite kommt durch die Überlagerung vieler solcher Wellensysteme zustande, die sich verstärken und auslöschen (Interferenz).

Als Ergebnis kann man festhalten: Wenn man versucht, Lichtbündel immer stärker einzuengen, dann kehrt sich unterhalb einer gewissen Größe die Einengung in das Gegenteil um. Eine Verkleinerung des Spalts weitert den Strahl um so stärker auf. Die minimale Breite des Strahls liegt in der Größenordnung der Lichtwellenlänge. Licht zeigt eine innere Mikrostruktur (Wellencharakter des Lichts), die eine weitere Verkleinerung nicht erlaubt. Umgekehrt kann man mit Licht keine Strukturen abbilden, die wesentlich kleiner als die Lichtwellenlänge selbst sind. Anders als bei der geometrischen Strahlenkonstruktion sind keine beliebigen Vergrößerungen und Verkleinerungen möglich oder sinnvoll. Es gibt eine natürliche Grenze, die durch die Natur des Lichts gegeben ist.

Die Wellenlänge des sichtbaren Lichts reicht von 400 Nanometer (blauviolett) bis 800 Nanometer (rot). Will man feinere Strukturen untersuchen, so muss man andere Lichtsorten mit kürzerer Wellenlänge verwenden (ultraviolettes Licht, Röntgenlicht). Als weitere Alternative bietet sich die Abbildung mit Teilchenstrahlen an. So basiert die Elektronenmikroskopie auf der Abbildung mit Elektronenstrahlen. Elektronen treten als Teilchen in Erscheinung, doch sie besitzen wie Licht auch Welleneigenschaften. Daher gibt es auch bei der Elektronenmikroskopie Grenzen der Auflösung, die um so kleiner werden, je höher die Elektronenenergie ist.

Unser optisches System ist so weit entwickelt, dass Beugungseffekte an unserer Pupille die natürliche Grenze unseres Sehvermögens darstellen. Im Alltag fällt nicht auf, dass ein „Lichtpunkt“ als ein Beugungsscheibchen endlicher Breite mit unscharfem Rand wahrgenommen wird. Solche Effekte machen sich bemerkbar, wenn man auf eine weit entfernte, nahezu punktförmige Lichtquelle blickt und das Auge zusammenkneift. Man bemerkt vorbeigleitende Objekte (Verunreinigungen in der Tränenflüssigkeit vor der Pupillenöffnung), deren



Ränder Beugungseffekte zeigen. Um nochmals auf die Liliputaner zurückzukommen: Anders als wir wären sie nicht in der Lage, ein Haar, das in deren eigener Armeslänge entfernt ist, zu erkennen. Der Sehwinkel ist in diesem Fall der gleiche wie bei uns, doch die Sehschärfe der Liliputaner ist eine Größenordnung schlechter. Der Durchmesser ihrer Pupille ist um den Faktor 12 kleiner. Die Beugungseffekte an der Pupillenöffnung sind entsprechend größer und das Bild des Haares würde um diesen Faktor unschärfer. Bei einer Verkleinerung von Lebewesen müsste ein anderer Typ von Auge entwickelt werden.

Die Augen der Bewohner von Mini- und Mikrowelten, von Insekten nämlich, sind tatsächlich anders konstruiert als unsere Linsenaugen, um dieser Beugungsgrenze zu entgehen. Es handelt sich um Facettenaugen, bestehend aus vielen Einzelaugen, die mosaikartig zum Komplexauge zusammengesetzt sind. Das optische System des Facettenauges entspricht ungefähr einem Bündel von Lichtleitern, die auf unterschiedliche Raumrichtungen ausgerichtet sind. Nur Licht aus einem engen Raumbereich wird in die Einzelaugen eingekoppelt und zu den lichtempfindlichen Sinneszellen weitergeleitet. Insektenaugen sind in anderen Bereiche des Spektrums empfindlich; Bienenaugen sehen nicht nur im Ultraviolett, sie können auch die Polarisation des Lichtes unterscheiden. Die Augen mancher Schmetterlingsarten werden durch zusätzliche Filter farbempfindlich.

### **EINTAUCHEN IN FLÜSSIGKEITEN: DIE KRAFT DER MOLEKÜLE**

Verkleinern wir uns in Gedanken, setzen uns in ein staubkorngroßes Mikro-U-Boot, das uns freundlicherweise Mikrosystemtechniker konstruiert haben, und tauchen in einen Wassertropfen ein! Schon beim Versuch des Eindringens erleben wir einen überraschenden Effekt, dem wir als Makrowesen bislang kaum Beachtung geschenkt haben. Die Wasseroberfläche wirkt wie eine elastische Haut. Sie ist nur schwer zu durchdringen. Insekten, wie beispielsweise Wasserläufer, nutzen diesen Effekt, der durch die sogenannte Oberflächenspannung zustande kommt. Ihre Beine, die vom Wasser nicht benetzt werden, drücken die Oberfläche aufgrund des Insektengewichts wie eine Gummimembran ein, was man bei einer ansonsten spiegelglatten Wasseroberfläche gut beobachten kann. Umgekehrt haben kleine Lebewesen, die vom Wasser benetzt werden, große Probleme, der Anziehungskraft der Oberfläche zu entkommen; Tautropfen können für manche Insekten tödliche Fallen darstellen.

Wir erleben hier die Wirkung molekularer Kräfte. Die Oberflächenspannung kommt durch die Anziehungskräfte der Flüssigkeitsteilchen untereinander zustande (Kohäsionskräfte). An der Oberfläche fehlen die Wechselwirkungspartner. Auf Teilchen an der Oberfläche wirkt daher eine nach innen gerichtete Kraft, die senkrecht auf der Oberfläche steht. Es resultiert eine Art Spannungszustand an der Oberfläche, der sich in verschiedenen Phänomenen äußert. Wassertropfen werden durch Oberflächenspannung zusammengehalten. In kleinen Tropfen herrscht dadurch ein besonders großer innerer Druck. Eine Vergrößerung der Oberfläche ist mit Energieaufwand verbunden. Um die Oberfläche gegen die nach innen gerichteten Anziehungskräfte verlassen zu können, benötigen Wassermoleküle Energie. Daher kühlen Flüssigkeiten beim Verdunsten ab.

Für die Benetzung sind Adhäsionskräfte zwischen Flüssigkeit und dem zu benetzenden Stoff maßgebend. Ob die Oberflächen von Stoffen durch Wasser benetzt werden oder nicht, hängt davon ab, ob die Kohäsions- oder die Adhäsionskräfte überwiegen. Hierbei spielt die Verschiedenartigkeit und die Stärke molekularer Bindungskräfte eine wesentliche Rolle. Die Wasserstoffatome und das Sauerstoffatom im Wassermolekül tragen unterschiedliche Ladungen. Das Molekül ist dadurch polar und kann mit anderen Stoffen, die ebenfalls polaren Charakter haben, gut wechselwirken und diese benetzen oder auflösen. Mit unpolaren Stoffen, beispielsweise Fett oder Wachs, ist das nicht möglich. Im Alltag bereitet dieses Spiel guter oder schlechter Benetzbarkeit Probleme bei der Reinigung. Viele Schmutzteilchen werden vom Waschwasser nicht benetzt. Erst nachdem das Waschmittel sie mit einer molekularen Schicht umgeben hat, die nach außen „wasserfreundlich“, also polar ist, werden Fett- oder kleine Staubeilchen von Wasser als seinesgleichen „erkannt“ und gelöst; es bildet sich eine Emulsion.

Dass man auch ohne Reinigungsmittel Oberflächen sauber halten kann, macht die Natur vor. Wassertropfen perlen an den Oberflächen von vielen Blättern erheblich besser ab als beispielsweise von perfekt glatten Glas- oder Lackoberflächen. Dieser Effekt verhilft der Lotuspflanze zu ihrer sprichwörtlichen Reinheit. Die Blattoberflächen sind mit Wachspartikeln bedeckt, allerdings nicht gleichmäßig, sondern in Form von feinen Noppen, die wenige Mikrometer hoch sind. Schmutzpartikel haften schlechter an diese rauen Oberflächen, ebenso das Wasser. Es bildet Tropfen, die gut ablaufen und beim Abperlen die

Schmutzpartikel mitnehmen. Die natürlichen mikrostrukturierten Oberflächen sind somit selbstreinigend. Dieses Zusammenwirken von wasserabweisenden Stoffen und Mikrorauhigkeit, der Lotus-Effekt, wird zunehmend technisch genutzt. Er vermindert den Reinigungsbedarf und den Einsatz chemischer Reinigungsmittel.

Für das Eintauchen in den Wassertropfen müssen wir von der Natur und der Waschmittelchemie lernen. Anders als beim Lotus-Effekt müssen wir die Oberfläche nicht wasserabweisend (hydrophob) sondern wasseranziehend machen. Nachdem wir das Mini-U-Boot mit einer wasserfreundlichen „hydrophilen“ Beschichtung versehen haben, macht das Eindringen keine Probleme.

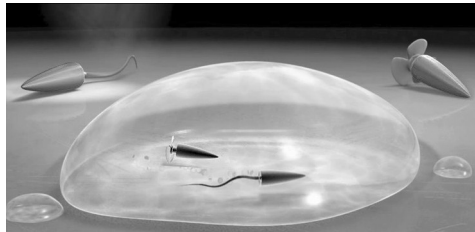


Abb. 4: Welcher Antrieb ist für das Schwimmen im Mikrokosmos eines Wassertropfens geeignet?

### SCHWIMMEN IN DER MIKROWELT

Stellen wir uns vor, wir hätten die Aufgabe einen möglichst effizienten Antrieb für das Mini-U-Boot zu entwickeln. Wir haben zwei alternative Antriebssysteme für die erste Testfahrt zur Auswahl – einen verkleinerten Propellerantrieb wie bei einem großen Boot und eine Art „Spiralantrieb“, ähnlich einem rotierenden Korkenzieher (Abb. 4). Den haben wir bei Geißeltierchen abgeschaut. Sie sind Bewohner der Welt, die wir nun bereisen wollen, und müssten eigentlich wissen, wie das Schwimmen am besten geht. Welcher der beiden Antriebe ist für unsere Zwecke besser geeignet?

Unser Mikro-U-Boot kann nicht einfach ein verkleinertes Abbild eines gewöhnlichen Tauchbootes sein. Tatsächlich wäre sein Propellerantrieb für die Fortbewegung unbrauchbar, während ein rotierender oder schwingender Geißel-Antrieb sich hervorragend bewährt. Das verblüfft, denn umgekehrt kann man mit einer rotierenden dünnen Spirale kein Boot in unserer Makrowelt effizient antreiben. Mit ein wenig Nachdenken und physikalischem Gespür sind die Hintergründe dieses überraschenden Verhaltens einsehbar: Es ist das Verhältnis

von Trägheitskräften und Reibungskräften, das ganz wesentlich das Verhalten von Strömungen im Großen und im Kleinen bestimmt.

Wie funktioniert ein gewöhnlicher Schiffsantrieb? Eine Schiffsschraube beschleunigt das Wasser und schleudert es nach hinten. Das ist an der Strömung, die von der Schraube ausgeht, erkennbar. Sie bleibt aufgrund der Trägheit noch eine Weile bestehen, bis sie schließlich durch die innere Reibung der Flüssigkeit zum Erliegen kommt. Der Antrieb basiert also auf dem Rückstoßprinzip: Die Schraube schleudert die Flüssigkeit nach hinten und die Reaktionskräfte treiben den Körper wie beim Strahlantrieb einer Rakete (Jet) vorwärts. Das Prinzip gilt auch für die Schwimmbewegungen von Menschen: Arm- und Beinbewegungen beschleunigen das Wasser. Geht man jedoch zu sehr kleinen Abmessungen über, so ändert sich das Bild: Das Verhalten von Flüssigkeiten im Kleinen gleicht nämlich den Eigenschaften eines zähen Sirups im Großen. Höhere Geschwindigkeiten werden sofort von der umgebenden Flüssigkeit gebremst. Ein Antrieb, der auf dem Rückstoßprinzip beruht, würde wenig nutzen. Im Kleinen bietet sich eher das Korkenzieher-Prinzip für den Schwimmantrieb an. Mikroorganismen schrauben sich beispielsweise durch die Rotation einer Geißel oder schlängeln sich durch Schwingungsbewegungen von feinen Härchen (Cilien) durch das für sie sehr zähe Medium. Für diese kleinen Wesen wirkt Wasser so zäh wie für uns Honig oder Melasse. Würden wir selbst hypothetisch auf Mikrometer-Maßstab verkleinert, so müssten wir beim Schwimmen und Tauchen gewaltig umlernen; die üblichen Schwimzüge wären nutzlos.

### DER TANZ DER STAUBTEILCHEN

Die Reise in dem Kleinst-U-Boot im Mikrometer-Maßstab wäre für die Insassen alles andere als komfortabel, denn das in die Flüssigkeit eingetauchte Boot führt eine andauernde Zitterbewegung aus. Es wird mit Ausschlägen ständig wechselnder Stärke auf chaotische Weise in die eine oder die andere Richtung getrieben. Der Botaniker Robert Brown hat 1827 beim Mikroskopieren von in Wasser suspendierten Pollenkörnern erstmals solche Bewegungen genauer untersucht. Die Körner wimmeln spontan umher als seien sie belebt. Brown hat zunächst geglaubt, darin äußere sich eine Lebenskraft des organischen Materials. Doch auch bei mineralischen Partikeln sowie an Staub- oder Rauchteilchen, die in der Luft schweben, lässt sich das Zittern

beobachten. Es erinnert an den von Lukrez beschriebenen Tanz von Stäubchen im Sonnenlicht aufgrund von Luftströmungen. Die unregelmäßige Zitterbewegung ist jedoch von Strömungen unabhängig und bleibt auch in völlig ruhiger Luft bestehen. Erst wenn die Temperatur herabgesetzt wird, vermindert sich die Heftigkeit der Bewegung.

Diese sogenannte Brown'sche Molekularbewegung ist das Ergebnis der chaotischen Wärmebewegung von Atomen oder Molekülen in Flüssigkeiten oder Gasen. Die kleinsten Teilchen bewegen sich in alle möglichen Richtungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Durch Stöße tauschen sie Energie aus und werden umgelenkt. Die im Mikroskop sichtbaren größeren Staubteilchen werden durch die unregelmäßig erfolgenden Stöße der unsichtbaren kleineren Atome und Moleküle angetrieben. Im Mittel ist die resultierende Kraft der stoßenden Teilchen Null. Es herrscht Gleichverteilung; deswegen bemerken wir im Großen das Chaos des thermischen „Gewimmels“ der Atome im Untergrund normalerweise nicht. Doch aufgrund der Kleinheit der suspendierten Staubteilchen schwankt die Zahl der stoßenden Atome und der von ihnen übertragene Impuls. Daher kommt es zu der sichtbaren Zitterbewegung der Staubteilchen.

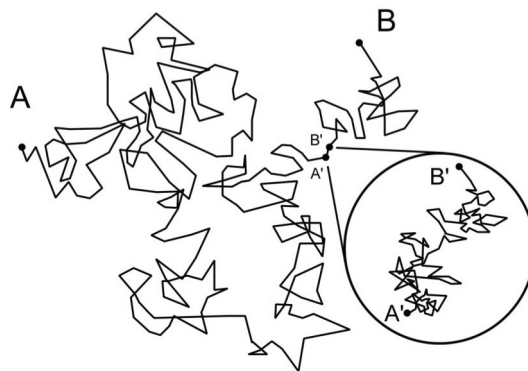


Abb. 5: Schematische Darstellung der Brown'schen Molekularbewegung eines Staubteilchens, das sich von A nach B bewegt hat. Seine Positionen sind in konstanten Zeitabständen festgehalten. Würde man einen Teil der Bahnkurve, z. B. von A' nach B' genauer und in kleineren Zeitabschnitten untersuchen, dann ergäbe sich eine ähnlich aussehende und noch feinere Zitterbewegung. Das Chaos der thermischen Bewegung ist bis hinunter auf atomare Größenordnung selbstähnlich.

Die mittlere Energie der Teilchen nimmt mit der Temperatur zu. Die statistische Deutung der Brown'sche Molekularbewegung ist insofern bedeutsam, als sie eine Brücke zwischen der unsichtbaren

Mikrophysik und sichtbaren makroskopischen Erscheinungen liefert. Einstein hat die Stärke der Schwankungen vor hundert Jahren als erster berechnet; aus ihr lässt sich die Zahl der Atome in einem Volumen ermitteln. Bis dahin sah man in Atomen nur hypothetische Gebilde, nützliche Konstrukte unserer Verstandestätigkeit zur einfacheren Beschreibung von Phänomenen. Einsteins Theorie von Schwankungserscheinungen im thermischen Gleichgewicht, die zu richtigen Vorhersagen atomarer Größen führte, hat allmählich einige der Skeptiker von der Existenz der nicht unmittelbar sicht- und fassbaren Atome überzeugt.

Die fiktive Verkleinerung hat unsere Beobachterperspektive in die eines Teilnehmers an dem Mikro-Geschehen gewandelt. Je kleiner das suspendierte Staubteilchen desto heftiger sind seine Reaktionen auf die Stöße der kleineren Atome und Moleküle. Das Teilchen erduldet aber nicht nur passiv die Stöße, es stößt seinerseits und gibt Energie an die umgebenden Teilchen ab. Stöße sorgen für Ausgleichsprozesse im molekularen Chaos: schnelle Teilchen werden abgebremst, langsame beschleunigt. Es stellt sich die gleiche mittlere Energie der Teilchen ein; Temperaturdifferenzen verschwinden. Makroskopisch ist das thermische Gleichgewicht mit Gleichverteilung und Langeweile gleichzusetzen, mikroskopisch ist dagegen immer „etwas los“, wie das Zappeln kleiner schwebender Staubteilchen zeigt.

Lange hat man die thermische Bewegung kleiner Teilchen als „lebendige Kraft“ (vis viva) bezeichnet, doch die regellose Bewegung ist nicht das, was Lebensprozesse auszeichnet. Biologische Zellen sind für ihr Überleben auf die Aufrechterhaltung des Unterschieds zwischen Innen- und Außenraum angewiesen. Aufgrund der Molekularbewegung sind im thermischen Gleichgewicht, das sich nach einiger Zeit von selbst einstellt, die Unterschiede im Mittel ausgeglichen. Es herrscht eine gleichmäßige Verteilung der Energie auf alle Teilchen und alle möglichen Energiespeicher. Energetische Differenzen verschwinden. Das thermische Gleichgewicht führt zum biologischen Tod. Wie kann, angesichts dieser Tendenz zur maximalen Unordnung und zur Gleichverteilung, welche in dem Text von Felix Auerbach so beredt dargestellt werden, ein lebendes System bestehen?

Eine ausreichende Temperatur und die damit verbundene thermische Aktivität von Atomen und Molekülen sind für das Leben unumgänglich. In diesem Sinne sind Lebensprozesse auf das Tanzen der Staubteilchen angewiesen. Das Leben führt jedoch eine subtile Ord-

nung ein, die auf Prozessen beruht, die nicht im thermischen Gleichgewicht sind. Der chaotische Tanz kleiner und kleinster Partikel wird geordnet, und zwar durch die Kopplung mit energieliefernden Prozessen und die Korrelation von Teilchenbewegungen über Maßstäbe, die von der atomaren Skala bis zur Größe des gesamten Organismus reichen.

### **DAS GROSSE, DAS KLEINE UND DIE MENSCHLICHE KREATIVITÄT**

Die Reise in die Mikrowelt des Staubes ist an einem Ende angekommen. Vielleicht ist es nur ein vorläufiges Ende, insofern als bei der Leserin oder dem Leser der Wunsch entstanden sein könnte, noch mehr über den mikroskopischen Untergrund dessen zu verstehen, was unsere unmittelbar erfahrbare, makroskopische Welt ausmacht, die natürliche ebenso wie die technische. Die Reise hat eine Vielzahl faszinierender Zusammenhänge erschlossen und die engen Verbindungen aufgezeigt zwischen dem Kleinen, dem Großen und dem, was sich in uns selbst abspielt. Die Strukturen und Strukturprinzipien der Welt im Kleinen sind zwar keine verkleinerten Abbilder dessen, was wir aus der Alltagswelt kennen, doch die Strukturen im Kleinen, im Großen und in uns selbst, denen wir auf der Reise begegnet sind, scheinen auf eine rätselhafte Weise zusammenzuhängen. Wir selbst, unser Körper und unser Geist, sind ein Teil der Natur, deren Wesen wir zu ergründen suchen. Die Vielzahl der Strukturen unterliegt offenbar universellen Strukturprinzipien, die über einen weiten Bereich von Größenordnungen von dem Makro- bis in den Mikrobereich hinein gültig sind.

Wissenschaft bezieht ihre Inspiration aus vielen Bereichen menschlicher Erfahrung. Ausgehend von literarischen Vorbildern sind wir in die Welt des Kleinen als Reisende eingetaucht. Wir waren sowohl reale als auch fiktionale Beobachter und Teilnehmer am Mikrogeschehen. Wir haben versucht, durch Real- und Gedankenexperimente geeignete Bilder und tragfähige Modelle des Kleinen zu erzeugen und zu überprüfen. Das mentale Eintauchen, das Vertiefen in einen Problembereich, das Herstellen möglichst vieler Verbindungen und das Knüpfen neuer Assoziationen sind Grundlagen wissenschaftlicher und technischer Kreativität. In ihrem Zentrum steht die produktive Verbindung von Theorie und Empirie, das Anknüpfen an Alltagserfahrungen („Sehen, was jeder sieht“), die theoriegeleitete Verallgemeinerung („Erkennen, was unsichtbar, aber allgemein gültig ist“) und schließlich die Überprüfung der Vorhersagen. Wir benö-

tigen dringend diese Kreativität und müssen sie weiter fördern, um unsere Zukunft aktiv gestalten zu können. Wenn künftig manche Leserinnen und Leser beim Anblick von Staub zu neuen Ideen inspiriert werden, dann haben die tanzenden Sonnenstäubchen des Lukrez vielleicht weitere kreative Wandlungsprozesse angeregt.

#### LITERATUR

DREXLER, K. Eric: Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation. Wiley, New York 1992.

EULER, Manfred: Mikrowelten – Eine Reise in die Mikrosystemtechnik. VDI/VDE Technologiezentrum. Teltow 2001.

EULER, Manfred: Das kreative Uhrwerksuniversum. Biologie in unserer Zeit 34, 2004, S.180–186.

LENZ, Peter: Biologische Motoren. Physik Journal 3, 2004, S.41–46.

LEIBNIZ, Gottfried Wilhelm: Monadologie. Stuttgart 1954.

LUKREZ: Von der Natur (Übers. H. Diels). München 1991.

MCMAHON, Thomas A. und John Tyler BONNER: Form und Leben – Konstruktionen vom Reißbrett der Natur. Heidelberg 1985.

VOGEL, Steven: Life in moving fluids: The physical biology of flow. Princeton 1994.



FELIX AUERBACH

## DIE WELTHERRIN UND IHR SCHATTEN (1902)

*Vorbemerkung des Herausgebers:*

*Der Pullover flust – aber die Fluse pullovert nicht.*

*In dieser scheinbar banalen Feststellung liegt ein wichtiges Naturgesetz verborgen. Denn alle materiellen Stoffe haben eine Tendenz, sich über die Welt zu verteilen. Aus dem Glas entstehen Scherben, aus den Scherben Splitter. Aber die Splitter fügen sich nicht wieder zu einem Glas zusammen. Hinter allen diesen Vorgängen – und damit hinter allen Vorgängen der Staubentstehung – steckt das Gesetz von der Vermehrung der Entropie. Dieses Gesetz hat der Physiker Felix Auerbach (1856–1933) zwar nicht entdeckt. Aber er hat es in seinem bereits vor über 100 Jahren erschienenen Essay in sehr klarer und sogar humorvoller Weise dargestellt. Daher haben wir seinen Essay in leicht gekürzter Form in dieses Buch aufgenommen.*

Wenn es wahr ist, daß ein Staatswesen erst in dem Augenblicke in einer dieses stolzen Namens würdigen Weise zu existieren beginnt, in dem es eine Verfassung enthält, die als oberstes Staatsgrundgesetz über allem thront, so muss man, in Anwendung auf das Weltganze, vom Standpunkte des Naturforschers aus betrachtet, sagen: Die naturwissenschaftliche Welt ist noch erstaunlich jungen Ursprunges. Denn erst seit wenigen Jahrzehnten sind wir im Besitze des Grundgesetzes, dem sich alles Naturgeschehen unterzuordnen hat, des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft, wie man früher sagte, von der Erhaltung der Energie, wie man, mit zweckmäßiger gewählter Nomenklatur, gegenwärtig sagt. Über allem, was sich im unendlichen Raume, im Strome der dahinfließenden Zeit abspielt, thront die Energie als Göttin, als Königin, hier gebend und dort nehmend, im ganzen aber weder gebend und dort nehmend. Wahllos in lautester Gerechtigkeit übt sie allenthalben ihre Macht aus; sowohl das winzige Stäubchen als auch

den genialen Menschen bestrahlt sie mit ihrem ruhigen, sich ewig gleich bleibenden Ganzen.

Wo aber Licht ist, da ist auch Schatten: und der Schatten, den die Weltherrin Energie hinter sich wirft, ist tief und schwarz, vielseitig und vielbeweglich. Es ist, als ob er ein selbständiges Leben hätte, als ob er sich gar anmaße, seinerseits die Welt zu regieren, und wahrlich nicht in dem nämlichen Sinne wie die Energie. Bei seiner Betrachtung kann man eine trübe Ahnung nicht bemeistern: Der Schatten ist der böse Dämon, der zu beeinträchtigen, wenn nicht gar zu verderben suchen wird, was sie strahlende Herrin in das Dasein an Großem, Schö-nem und Gutem hineinzutragen sich bemüht. Wir nennen den bösen Dämon Entropie, und es hat sich herausgestellt, daß er wächst und wächst, daß er langsam, aber sicher seine bösartigen Tendenzen ent-faltet. Welche Beruhigung – so muss man fragen – kann uns die Verfas-sung gewähren, wenn ohne Unterlaß Kräfte thätig sind, um sie zu untergraben? Was kann die Energie auf die Dauer nützen, wenn ihr Schatten, je mehr es Abend wird auf Erden, länger und länger wird, um schließlich alles in finstere Nacht zu hüllen?

Wir alle stehen unter dem Schutze der Energie, und wir alle sind dem schleichenden Gifte der Entropie preisgegeben. Sollte es nicht auch für uns, an welchem Teile des Weltgebäudes, an welchem Teile des Menschheitsideals wir auch thätig sein mögen, der Mühe lohnen, uns mit dem Wesen jener beiden Dämonen vertraut zu machen, uns ihr Wirken näher zu betrachten? Nicht durch das Mikroskop des Fach-mannes, mit dem wir nicht fein genug umzugehen verstehen, um so ätherische Dinge im rechten Lichte zu sehen; aber mit der Lupe des Liebhabers, der auf mancherlei verzichtend, doch vieles zu schauen bekommt, was ihm bis dahin verborgen geblieben war.

Die Sprache, die stets feinfühlig, hat die Energie wie die Entro-pie weiblich gebildet. Und das Wesen des Weibes zu ergründen, ist seit Menschengedenken eine der heikelsten Aufgaben gewesen. Ge-wiß, es giebt auch hier Unterschiede; und während mit der bei Tag und Nacht in Gattentreue sich gleichbleibenden Penelope schon der Gymnasiast im großen und ganzen sich abfindet, beschäftigt es noch die Reifsten, was wohl im innersten Seelengrunde der verwandlungs-süchtigen Kirke schlummern möge. So hat auch die Energie, wenn-gleich erst nach jahrhundertelangem Ringen, ihr Wesen klar ent-hüllt; aber um so launischer und unberechenbarer hat sich die Entropie erwiesen; immer, wenn man ihr nahe zu sein wähnte, hat sie

ein neues Rätsel aufgegeben; ja, so weit erstreckt sie ihren bösen Zauber, daß sie, und zeitweilig mit einigem Erfolge, uns die gütige Schwester zu verdächtigen suchte, indem sie uns zuraunte: Traut ihr nicht, sie ist nicht das, was sie zu sein scheint. Aber die Gedankenarbeit der letzten Jahrzehnte hat uns solchen Künsten gegenüber gefestigt, und jetzt, auf der Schwelle des zwanzigsten Jahrhunderts, wissen wir in der Hauptsache, was es mit dem Schwesternpaare für eine Bewandnis hat. Es ist ein eigentümlicher Verlauf, den die Geschichte so mancher hervorragenden Entdeckung oder Erfindung genommen hat, und man ist versucht, darin beinahe eine Art von Gesetz zu erblicken. Die Entdeckung taucht auf, findet bei der ihrem Urheber geistig nicht ebenbürtigen Mitwelt kein oder mangelhaftes Verständnis und bedarf vielleicht einer ganzen Generation, eines Zeitraums von Jahrzehnten, um die verdiente Wertschätzung zu finden; dann aber tritt der Umschlag ein, und die Bedeutung der Entdeckung wird überschätzt; schließlich ist es zuweilen gar nicht die leichteste Aufgabe, diesen Überschwang einzudämmen und die richtigen Grenzen festzusetzen. Es ist eine Art von Pendeln, wie es im Beginne vieler Vorgänge, physischer und geistiger auftritt, ehe sich das Gleichgewicht einstellt.

So sehen wir auch hier, daß nachdem es fast ein Menschenalter gedauert hatte, bis das Energieprinzip sich völlig durchgedrungen hatte, nun eine Ära seiner Überschätzung anhub. Man glaubte vielfach in ihm das Allheilmittel für Defekte in der Naturerkenntnis zu besitzen, man erklärte es für das Grundgesetz alles Geschehens im Weltall.

Hier ist nun, ehe in der Hauptbetrachtung fortgefahren wird, eine kleine Einschaltung zu machen. Man wird sagen: Von *einem* Grundgesetz kann doch gar nicht die Rede sein, da wir deren schon zwei, die Erhaltung des Stoffes und die Erhaltung der Energie, kennen. Ganz richtig; aber diese beiden Gesetze sind im wesentlichen eines Inhalts, sie können zu einem einzigen, dem Erhaltungsprinzip, zusammengezogen werden. Man kann sogar noch einen Schritt weiter gehen und das Stoffprinzip nur als einen Spezialfall des Energieprinzips gelten lassen, indem man davon ausgeht, daß der Stoff in letzter Instanz nichts anderes ist, als eine durch seine vielfache Beständigkeit besonders scharf umgrenzte Erscheinungsform der Energiewirkungen, z. B. von Druck- oder Lichtwirkungen, als etwas, was wir als Träger von Energiewirkungen betrachten, als eine charakteristische Art von Energiekomplexen. Indessen wollen wir diesen Gedanken, dessen

Ausführung auf mancherlei Schwierigkeiten stößt, hier nicht weiter verfolgen und uns damit begnügen, das Erhaltungsprinzip als ein einheitliches Stoff und Energie umfassendes Grundgesetz hinzustellen.

Ist nun – und damit kommen wir zur Hauptsache zurück – ist das Erhaltungsgesetz wirklich das Prinzip alles Naturgeschehens? Diese Frage kann man in einem gewissen Sinne mit ja, muß sie aber in einem tieferen und schließlich entscheidenden Sinne mit nein beantworten, und es genügt eine etwas präzisere Fragestellung, um das mit Leichtigkeit einzusehen, ja, um sich zu wundern, daß man überhaupt versuchen konnte, sich mit dem Erhaltungsprinzip zugute zu geben.

Was ist denn Naturgeschehen? Was ist denn das Gemeinsame aller Ereignisse, aller Vorgänge im Weltall? Offenbar Veränderung. Was sich ändern kann, ist außerordentlich vielerlei: der Ort im Raume, die Geschwindigkeit und die Richtung der Bewegung, der Druck, die Form und die Farbe, die Zellen und die Organe der Lebewesen; es geht Bewegung in Wärme, Elektrizität in Licht über, es wechselt ohne Unterlaß Leben und Tod. Alle diese Veränderungen erfolgen, ohne daß sich dabei die Stoffmenge und die Energiemenge ändern, sie erfolgen unter Wahrung des Erhaltungsprinzips. Erfolgen sie aber auch aus Anlaß des Erhaltungsprinzips? Sicherlich nicht; denn die Forderung desselben wird doch am einfachsten dadurch erfüllt, daß überhaupt nichts geschieht. Wenn ich in einem mit Nippsachen überfüllten dunklen Zimmer auf einem Stuhle zurückgelassen werde mit der einzigen Aufgabe, nichts zu zerbrechen, so wäre ich sehr dumm, wenn ich diese Aufgabe nicht in der Weise löste, daß ich auf dem Stuhle sitzen bleibe, ohne mich zu rühren; ich könnte mich ja auch fortwährend recht geschickt zwischen den Zerbrechlichkeiten hindurchwinden, aber diese Lösung der mir gestellten Aufgabe wäre unnötig kompliziert. Wenn es also nach dem Erhaltungsprinzip allein ginge, so brauchte in der Welt gar nichts geschehen. Und damit zeigt sich auch das Prinzip in seinem wahren Lichte: es ist, bei all seiner großartigen Bedeutung, doch im Grunde von negativem Charakter, indem es aussagt: bei allen Veränderungen in der Natur bleiben Stoff- und Energiemenge ungeändert. Es ist also eigentlich recht sonderbar, wenn man auf die Frage nach dem Grundgesetz aller Veränderungen in der Natur antwortet: Stoff- und Energiemenge ändern sich nicht; es ist etwa so, wie wenn ich auf die Frage nach den Wandlungen, die Robert Mayer in seinem Leben durchgemacht habe, antwortete: er hieß immer unverändert Robert Mayer – oder um etwas weniger Äußerliches zu nehmen: er blieb im-

mer, auch auf der Höhe seines Ruhmes, derselbe schlichte, fromme Mann. Daß er das blieb, ist gewiß sehr interessant, ist aber keine Antwort auf die Frage, welche Wandlungen er durchgemacht hat.

Das Erhaltungsprinzip hat lediglich die Bedeutung, daß nichts gegen sein Gebot geschehen darf; es hat nicht die Bedeutung, daß aus ihm heraus, auf seine Initiative wirklich etwas geschähe. Es ist Aufsichtsbehörde, nicht Unternehmer. Es ist von regulativem, nicht von produktivem Charakter.

Diese Antithesen legen uns die Frage nahe: Giebt es neben dem Erhaltungsprinzip nicht auch ein Veränderungsprinzip? Ein Prinzip, welches angiebt, wann in der Welt etwas geschieht und was alsdann geschieht? Von einem derartigen Prinzip wird man, da es die ungeheuerere Mannigfaltigkeit alles Naturgeschehens mit einem Bande umschlingen soll, billigerweise nicht zu viel verlangen dürfen; man wird sich mit irgend etwas Gemeinsamem, mit einer in allen Vorgängen sich geltend machenden Tendenz begnügen müssen: man wird schon Erstaunliches erreicht haben, wenn es gelingt: erstens die Bedingungen einander gegenüber zustellen, unter denen nichts und unter denen etwas geschieht, und zweitens, wenn etwas geschieht, anzugeben, warum dies und nicht vielmehr das Gegenteil geschieht. Solche entgegengesetzte Möglichkeiten, rein logisch gefaßt, sind ja stets vorhanden: ein Körper kann, wenn er nicht überhaupt am Orte bleibt, sich nach links oder nach rechts bewegen, er kann wärmer oder kälter werden; ein in einer Salzlösung steckender Krystall kann sich durch Auflösung verkleinern oder durch Abscheidung vergrößern, eine Krankheit kann zur Gesundheit oder zum Tode führen. Das sind wie gesagt, logische, d.h. Denkmöglichkeiten; thatsächlich kann natürlich nur das eine oder andere eintreten, da sonst jede Eindeutigkeit, jede Weltordnung aufhören würde; und ob nun thatsächlich das eine und nicht das andere eintritt, oder umgekehrt das andere und nicht das eine eintritt, das ist die große Frage, um die es sich hier handelt. Es ist nun gar nicht schwer, bei den Vorgängen der Natur gewisse Tendenzen zu erkennen. Fangen wir mit der Ortsänderung der Körper an, und nehmen wir diejenigen Bewegungen, die wir der Schwerkraft, d.h. einer im Inneren der Erde gedachten Anziehungskraft, zuschreiben. Diese Bewegungen heißen Fallbewegungen, und in diesem Namen ist die Tendenz schon enthalten. „Es fällt alles nach unten, nichts nach oben“, heißt es im Volksmund. Alle natürlichen Gewässer fließen thalwärts und schleppen dabei ausserdem feste Teilchen mit sich, die sie tief unten,

z. B. in ihrem Mündungsgebiet, absetzen; jede Lawine und jeder Bergsturz befördert Materie von oben nach unten, von einem höheren Niveau zu einem tieferen. Man kann diese Tendenz nicht treffender charakterisieren, als indem man sie als Ausgleichung bezeichnet, als eine Ausgleichung der auf der Erdoberfläche vorhandenen Niveauunterschiede; ein Ausgleich, der sehr langsam, aber unerbittlich von statten geht. Hat man doch schon zu berechnen versucht, daß nach vielen Jahrtausenden unser mächtigstes europäisches Gebirge, die Alpen, infolge jener Vorgänge „abgetragen“ sein wird; eine Berechnung, deren Mitteilung kürzlich ein Blatt mit der Bemerkung begleitete, daß alsdann die Fahrrad- und Automobil-Verbindung zwischen Deutschland und Italien wesentlich erleichtert sein werde – vorausgesetzt, daß es dann überhaupt noch Radler und Autler geben sollte.

Gegen diese Theorie des Ausgleichs der Niveauunterschiede läßt sich freilich ein naheliegender und berechtigter Einwand erheben, und das führt uns auf eine wichtige Gegenüberstellung verschiedenartiger Vorgänge. Es finden nämlich zahlreiche Geschehnisse statt, bei denen die vorhandenen Niveaudifferenzen nicht gemildert, sondern im Gegenteil noch gesteigert werden. Insbesondere wird man hier an die Tätigkeit des Menschen denken, der z. B. bei jedem Bauwerk, das er errichtet, Materialien von der Erdoberfläche in die Höhe hebt. Aber auch die Natur selbst ist nicht selten in gleichem Sinne tätig; es sei nur auf die augenfälligste derartige Erscheinung hingewiesen, auf das Ausströmen von Lava und das Herausfiltern von Steinen aus dem Erdinnern bei der Tätigkeit der Vulkane. Man muß also unterscheiden zwischen zwei Erscheinungsklassen von gegensätzlichem Verhalten, die man als freiwillige und erzwungene Erscheinungen bezeichnen kann, wobei dann freiwillige Erscheinungen solche sind, die „von selbst“, d.h. aus eigener Kraft, eintreten, erzwungene dagegen solche, die hierzu äußerer, fremder Hilfe bedürfen; in dem einen der obigen Beispiele leistet diese Hilfe der Mensch, in dem anderen die im Innern der Erde vorhandene Spannungskraft. Alle freiwilligen Vorgänge führen also schließlich zu einer Ausgleichung der Niveauunterschiede; die erzwungenen thun dies allerdings nicht, dafür nehmen sie aber fremde Hilfe in Anspruch, und dadurch entsteht eine Komplikation, die zunächst verhindert, uns ein Urteil über die Tendenz dieser Prozesse zu bilden.

Wir haben bisher von Bewegung der Materie und von dem dadurch hervorgerufenen Niveauausgleich gesprochen. Aber Entspre-

chendes gilt auf allen Gebieten, gilt z. B. auch für die Wärme. Die beiden wichtigsten Wärmevorgänge sind die Wärmestrahlung und die Wärmeleitung. Durch Strahlung giebt die heiße Sonne Wärme an die kühlere Erde ab, und der feste Erdball selbst giebt von seinem Überschusse Wärme ab an die ihn umgebende Lufthülle. Wenn wir einen Metallstab an dem einen Ende erhitzen (ein Vorgang, den wir erzwingen müssen), dann aber sich selbst überlassen, so strömt die Wärme von dem heißen nach dem kalten Ende, jenes wird allmählich kühler, dieses wärmer; es findet also ein Ausgleich der Temperaturen statt.

Verallgemeinern wir jetzt unseren Gedanken und wenden ihn auf Niveau-, Spannungs-, Temperatur-Ausgleiche u.s.w. an, so fangen wir an einzusehen, daß schließlich auch die erzwungenen Vorgänge sich ihm fügen. Denn wenn bei dem Ausbruche des Vulkans allerdings Massen – entgegen der Ausgleichstendenz – emporgehoben werden, so findet dafür im Innern der Erde ein Spannungsausgleich statt, der vielleicht um so stärker ins Gewicht fällt. Und bei der Erhitzung des Metallstabes? Sie wird etwa durch eine Gasflamme bewerkstelligt, die dem im Spannungszustande befindlichen Leuchtgase das Verbrennen ermöglicht. So sehen wir, daß die Tendenz des Ausgleichs, unmittelbar oder mittelbar, überall durchdringt, mit unerbittlicher Gewalt. Ist der nach den Umständen überhaupt mögliche Ausgleich schon vorhanden, so geschieht überhaupt nichts, es herrscht Gleichgewicht; wenn nicht, dann geschieht etwas, und die Tendenz dieses Geschehens ist der fortschreitende Ausgleich.

Eine so wichtige und umfassende Frage wie die nach dem Charakter alles Naturgeschehens verdient in jeder Weise, die sich darbietet, beleuchtet zu werden; und so wollen wir jetzt eine zweite Auffassung besprechen, um ihr noch eine dritte folgen zu lassen. Dabei wollen wir wieder an ein einfaches Beispiel anknüpfen. Wir wollen uns eine große Wanne kalten und ein kleines Glas voll heißen Wasser denken und diese letztere in jene hineinschütten; das Ergebnis wird sein, daß das kalte Wasser in der Wanne ein klein wenig lauer geworden ist; wenn die ursprünglichen Temperaturen etwa  $5^{\circ}$  in der Wanne und  $95^{\circ}$  im Glase waren, so ist die jetzige Temperatur vielleicht  $6^{\circ}$ . Nach dem Erhaltungsprinzip ist bei diesem Mischungsprozeß die Gesamtmenge an Wärmeenergie unverändert geblieben. Während aber die Energie in dem Glase vorher konzentriert war, ist sie jetzt in dem großen Raume der Wanne zerstreut. Man kann also den geschilderten Vorgang als eine Zerstreung der Energie charakterisieren. Solche Energiezer-

streuung kommt nun allenthalben in der Natur vor, sei es nun Zerstreuung von Bewegung, von Wärme oder Licht, von Elektrizität oder Magnetismus. Die Erscheinung, welche die Zerstreuung der Bewegungsenergie hauptsächlich auf dem Gewissen hat, ist die Reibung; sie hat zur Folge, daß, wenn sich ein Körper bewegt, er seine Umgebung mit in Bewegung setzt, ohne daß dies irgend erwünscht wäre. Das Schiff schleppt eine gute Portion Wasser, das Luftschiff eine gute Portion Luft mit sich, natürlich auf seine Kosten – Zerstreuung von Energie. Wenn wir irgend etwas erhitzen wollen, erhitzen wir wohl oder übel ein erhebliches Gebiet der Umgebung mit – Zerstreuung von Energie. Wenn wir den Eisenanker einer Dynamomaschine magnetisieren, um dadurch elektrische Ströme zu erzeugen, können wir nicht hindern, daß ein, wenn auch mit fortgeschrittener Technik immer kleiner werdender Teil der magnetischen Energie sich in die Luft verliert – Zerstreuung von Energie.

Wir wollen versuchen, diesen merkwürdigen Vorgang etwas präziser zu fassen, und das führt uns zu dem schon angekündigten dritten Gliede unserer Betrachtung. Was geschieht denn mit der Energie, wenn sie sich zerstreut? Ihr Beitrag ändert sich nicht, das ist sicher; aber ebenso sicher ist, daß sich etwas geändert hat. Daß das kein Widerspruch ist, zeigt das Beispiel der Zahl 12, die immer 12 bleibt, auch wenn sich das Gesetz ihrer Bildung aus  $1 \times 12$  in  $2 \times 6$  oder in  $3 \times 4$  ändert. Auch die Energie kann als das Produkt zweier Faktoren aufgefaßt werden, und es lassen sich diesen Faktoren sogar höchst bezeichnende Namen beilegen: der eine ist ihr Extensitätsfaktor, der andere ihr Intensitätsfaktor. Hat man z. B. ein Glas heißes Wasser, so ist der Extensitätsfaktor klein, der Intensitätsfaktor groß; bei der Wanne lauen Wassers ist es umgekehrt – das Produkt aber, die Energiemenge, kann dabei in beiden Fällen sehr wohl genau dasselbe sein. Solche Faktoren spielen bei den verschiedenen Energieformen eine wichtige Rolle. Was z. B. ein elektrischer Strom zu leisten vermag, hängt erstens von der Strommenge (gewöhnlich Stromstärke genannt), zweitens aber von der Spannung ab; jene, in Ampères gemessen, ist der Extensitäts, diese, in Volts gemessen, der Intensitätsfaktor der Stromenergie.

Mit Hilfe dieser Begriffe kann man nun die Tendenz der Vorgänge in der Natur dahin kennzeichnen, daß die Energie an Extensität wächst, an Intensität aber abnimmt. Bei den freiwilligen Vorgängen ist dies ohne weiteres richtig; bei den erzwungenen stimmt es auch, wenn



man beachtet, daß hier fremde Energie gezogen wird, und daß man diese natürlich in den Kreis der Rechnung mit hineinziehen muß. Die Zerstreuung der Energie tritt von selbst ein, ihre Wiedersammlung muß erzwungen und darum vergütet werden, und sie kann nur erzwungen und vergütet werden durch Zerstreuung der fremden, zu Hilfe gezogene Energie. Es ist wie bei einer Vase, die ich eigenhändig und gratis zerbrechen kann, während ich zu ihrer Zusammensetzung den geschickten und geübten Handwerker brauche und denselben honorieren muß.

Kann denn aber überhaupt alles, was in der Natur geschieht, wieder rückgängig gemacht werden? Um diese Frage zu verneinen, braucht man gar nicht einmal die Vorgänge höchster Ordnung, wie den Lebensprozeß, heranzuziehen, man kann sich mit weit einfacheren begnügen. Wenn wir uns des lauen Wassers in der Wanne erinnern, so haben wir schon ein Beispiel; denn niemand vermag aus ihr das heiße Wasser, das ursprünglich in dem Glas war, herauszuholen. Man spricht daher von „nichtumkehrbaren“ Prozessen im Gegensatz zu „umkehrbaren“. Unter den letzteren ihrerseits sind so manche, bei denen die Umkehrbarkeit zwar in der Idee vollkommen ist, in der Wirklichkeit aber doch auf große Schwierigkeiten stößt. Es ist sehr leicht einen Sack voll Erbsen zu verstreuen, aber außerordentlich mühsam, die Erbsen nun wieder einzusammeln; und man könnte getrost wetten, daß dabei eine oder einige von den tausend Erbsen verloren gehen, weil sie sich in den Ritzen des Bodens versteckt haben. Wendet man dies auf wirkliche Erscheinungen der Natur oder der Technik an, so findet man, daß man zwar zahlreiche Prozesse rückläufig machen kann, daß dabei aber eine vollkommene Umkehrung nicht erreicht wird. Jeder Maschinenkolben kehrt seine Bewegung fortwährend um, indem er bald auf- und bald absteigt oder bald hin- und bald hergeht; aber gewisse hiermit verbundene Nebenerscheinungen kehren sich nicht um, z. B. die Abnutzung des Materials, die sich bei einem Hin- und Hergange nicht ausgleicht, sondern im Gegenteile summiert – die Folge ist die, daß eben der Vorgang kein vollkommen umkehrbarer ist.

Es giebt also überall nur Prozesse, die überhaupt nicht oder doch nur unvollkommen umkehrbar sind. Was geschehen ist, ist geschehen, und die dabei zerstreute Energie läßt sich nicht oder doch nicht vollständig wieder sammeln. Es ist, als ob eine höhere Behörde von jedem Vorgang in der Natur eine Steuer erhöhe; und wenn der Versuch gemacht wird, diese Steuer durch Einleitung erzwungener,

umgekehrter Prozesse zu umgehen, so folgt die Hinterziehungsstrafe auf dem Fuße.

Wir haben bisher nur an Bewegungsvorgänge als solche, an Wärmeerscheinungen als solche u.s.w. gedacht. Noch interessanter sind aber Vorgänge, bei denen die Energie ihre Qualität verändert, also z. B. Wärme sich in Bewegung umwandelt. Solche Prozesse, wie sie sich unter anderem in der Dampfmaschine abspielen, wollen wir jetzt ins Auge fassen.

Die Dampfmaschine hat die Bestimmung, die Wärmespannung des Wasserdampfes in Bewegung, also in Arbeit umzusetzen. Dabei gilt das Energieprinzip, d.h. es geht Energie weder verloren, noch wird solche gewonnen. Wollte man dies aber so auffassen, daß die Maschine eine der aufgewandten Wärmemengen äquivalente Arbeitsmengen, also für jede Kalorie 428 Meterkilogramm lieferte, so würde man durch die Thatsachen stark enttäuscht werden. Die Maschine liefert weit weniger Arbeit, und es entsteht die Frage: Wo ist der Rest geblieben? Wir sind vorbereitet genug, um die Antwort zu geben: der Rest ist zerstreut. Ein Teil davon ist in das Material der Maschine gegangen, hat es abgenutzt, erwärmt u.s.w.; es ist eben wieder das alte Lied von der Nichtumkehrbarkeit der Nebenprozesse. Aber auch wenn man hiervon ganz absieht, wenn man die Thätigkeit der Maschine als einen umkehrbaren Prozeß betrachtet, bleibt noch ein Rest, und zwar ein recht erheblicher, der nicht in Arbeit umgesetzt wird, der vielmehr als laue Wärme in den sogenannten Kondensator oder Kühler, oder, wo dieser fehlt, in die freie Luft geht, die dann die Rolle des Kühlers übernimmt. Es läßt sich streng nachweisen, daß keine Wärmemaschine mit einem Kessel allein funktionieren kann, sie muß auch einen Kühler haben. Ein Teil der Kesselenergie wird in Arbeit verwandelt, der andere wird als laue Wärme an den Kühler abgeführt. Das ist die Steuer, von der schon die Rede war, und aus dem Staate, in dem sie als Einkommensteuer erhoben werden würde, würden vermutlich sehr bald die meisten Bürger auswandern – denn sie beträgt im besten Falle siebenzig Prozent! Den in Arbeit verwandelte Teil der in die Maschine hineingesteckten Energie nennt man ihren Wirkungsgrad, den Rest kann man als Zerstreuungsgrad bezeichnen. Steuern zahlt niemand sonderlich gern, und so bemüht man sich denn seit langer Zeit, die Dampfkraft durch andere zu ersetzen, deren Wirkungsgrad günstiger ist – zum Teil mit, zum Teil noch ohne durchschlagenden Erfolg. Was für uns aber im Prinzip die Hauptsache ist, ist dies, daß der Wirkungsgrad niemals die vollen hundert Prozent erreichen kann. Ohne Zer-

streuung von Energie geht es auch hier nicht ab. Eine Vorstellung von der Tendenz alles Geschehens, von dem Prinzip, nach dem sich alles abspielt, haben wir nun gewonnen, und es bleibt nur übrig, einen Träger dieses Prinzips aufzustellen, einen Begriff einzuführen, unter dessen Devise die Veränderungen in der Welt stehen, wie die Erhaltung unter der Devise „Energie“ steht. Für diesen Begriff hat der deutsche Gelehrte, der auf diesem Gebiete überhaupt größere Verdienste als irgend ein anderer hat, Rudolf Clausius, einen Namen ersonnen; und Begriff und Name sind, wie man objektiv bekennen muß, in mancher Hinsicht sehr glücklich, in mancher ebenso unglücklich gewählt.

Den Zerstreuungsgrad der Energie, ihren Extensitätsfaktor, nennen wir nach Clausius die Entropie, und wir haben dann den Satz von weltumfassender Bedeutung: Die Entropie nimmt im großen Ganzen fortwährend zu, oder: Die Entropie strebt einen Maximum zu.

Entropie heißt „Nach-innen-kehrung“, und man wird mit Recht fragen, wie sich diese Bezeichnung mit der Bedeutung der Entropie als Zerstreuungsgrad verträgt. Dazu müssen wir ein klein wenig weiter ausholen.

Zwischen Bergwerk und Bergwerk ist ein Unterschied; es giebt abbaufähige und abbauunfähige – letztere nicht deshalb, weil sie nichts wert sind, sondern weil sie unzugänglich oder zu schwer zugänglich sind. Ähnlich verhält es sich mit der Energie. Zwei Energiemengen können an Zahl der Ergs ganz gleich sein, und doch kann die eine „abbaufähig“ und darum wertvoll, die andere „abbauunfähig“ und deshalb wertlos sein. Mit einem Topf kochenden Wassers kann man eine kleine Dampfmaschine, sei es auch nur für die Kinderstube, treiben; mit einer großen Wanne Wasser von der Temperatur der Umgebung kann man nichts anfangen. Im Atlantischen Ozean ist so unvorstellbar viel Energie in Form von Wärme enthalten, daß man damit in der Theorie, d.h. nach dem Energieprinzip, alle Dampfschiffe der Welt treiben und noch sehr viel anders machen könnte; thatsächlich kann man so gut wie nichts damit anfangen, weil diese Energie zerstreut, weil sie ausgeglichen ist: zu dem „Kessel“ Ozean fehlt der Kühler. Bei dem Prozeß einer Dampfmaschine wird, wie wir sahen, ein Teil der hineingesteckten heißen Wärme als Arbeit „verwertet“, der Rest aber zu kalter Wärme „entwertet“. Statt Zerstreuung von Energie kann man also auch sagen: „Entwertung der Energie“. Diese Entwertung ist unter dem Bilde der „Nach-innen-Kehrung“ verstanden, und insofern ist der Ausdruck Entropie höchst glücklich gewählt. Unglücklich gewählt ist

er insofern, als er, durch seine Eigenschaft der Vermehrung, leicht irri-  
ge Vorstellungen erwecken oder die richtige Vorstellung erschweren  
kann. Es wäre besser gewesen, nicht dem Extensitätsfaktor, sondern  
dem Intensitätsfaktor der Energie einen Namen zu geben, wöfür sich  
das entsprechende Wort „Ektropie“ (Nach-außen-kehrung) dargebo-  
ten hätte, und für diese das Prinzip aufzustellen: Die Ektropie der Welt  
strebt einem Minimum zu. Die ungünstigste Tendenz im Weltprozeß  
wäre damit zu einem direkten und positiven Ausdrucke gekommen.

Es liegt nahe, der ganzen Lehre von der Energie, ihrer Erhaltung  
einerseits, ihrer Entwertung andererseits, den Vorwurf der Spiegel-  
fechtereie zu machen; denn entweder bleibe die Energie erhalten oder  
sie werden entwertet. Aus der gegebenen Darstellung geht indessen  
hervor, daß beides sehr wohl miteinander vereinbar ist; und es können  
hierfür noch zwei einfache Gleichnisse herangezogen werden.

Das eine von ihnen knüpft an ein schon früher gebrauchtes an, an  
die Vorstellung, daß die Natur gegen Verlust von Energie irgend einer  
Art versichert ist, in dem sie in anderer Energieform, z. B. für verlorene  
Arbeit in Form von Wärme Ersatz leistet; der Stein fällt zu Boden, sei-  
ne lebendige Kraft ist dahin, der Boden wird erwärmt, und die Wärme  
ist der zahlenmäßige Ersatz für die lebendige Kraft – freilich kein be-  
friedigender insofern, als mit Hilfe dieser Bodenwärme dem Steine sei-  
ne lebendige Kraft nicht wiedergegeben werden kann. Es verhält sich  
das genau so, wie wenn mir einige wertvolle Handschriften verbrannt  
sind und nach dem durch Sachverständige festgesetzten Werte in Geld  
ersetzt werden: die Versicherungsgesellschaft kann unmöglich mehr  
tun, und doch ist mir schlecht geholfen, die Handschriften kann ich mit  
Hilfe des Geldes nicht wieder herbeizaubern, sie sind unwiederbring-  
lich verloren. So hindert auch in der Natur der äquivalente Ersatz nicht,  
daß fortwährend Nutzenergie unwiederbringlich verloren geht, daß  
die Ektropie fällt und fällt, daß die Entropie wächst und wächst.

Ein anderer, alltäglich und überall sich abspielender Prozeß, bei  
dem Erhaltung und Umwertung Hand in Hand gehen, ist das kauf-  
männische Geschäft: der Preis ist das Äquivalent der Ware, und doch  
hat jeder der Kontrahenten einen Gewinn (sonst würde er ja das Ge-  
schäft nicht machen). Die Summe der objektiven Werte wird durch  
den Tausch nicht geändert, aber die Summe der subjektiven Werte  
steigt. Die Natur macht auch fortwährend Tauschgeschäfte; nur ist sie  
leider ein Hans im Glück, sie tauscht jedesmal Minderwertiges ein  
und wird damit immer ärmer.

Wir kommen zum Schluß, zum Ausblick in die Zukunft.

Die Energie bleibt konstant, die Entropie wächst. Die Sonne leuchtet, aber die Schatten werden länger und länger. Überall Zerstreuung, Ausgleich, Entwertung. Die Kohle verbrennt zu Asche, aus der nie wieder Kohle wird, die Berge stürzen ab und bauen sich nicht wieder auf, die Wärmequellen strahlen aus und haben keine Gelegenheit, sich wieder zu ergänzen. Muß nicht der Zeitpunkt kommen, wo alles Entropie, nichts mehr Ektropie ist? Denn daß die von der Natur oder vom Menschen in Scene gesetzten Erscheinungen, bei denen ausnahmsweise Energie konzentriert, differenziert, gehoben wird, daß sie nur Tropfen auf den heißen Stein sind, daß sie den Gesamtprozeß höchstens ein wenig aufhalten, aber nicht hindern können, darüber können wir uns keiner Täuschung hingeben. Der Zustand aber, der alsdann eintritt, kann kein anderer als der allgemeine Stillstand alles dessen, was Leben, was Geschehen heißt, sein. Für die Menschheit ein Zustand, vergleichbar mit dem des Tantalus und seinen Qualen: ringsum Energie, aber nicht faßbar!

Glücklicherweise gibt es Erwägungen, welche dieser Perspektive ihre Trostlosigkeit nehmen, und von diesen Erwägungen steht die folgende in einer Reihe. Ausgleichsprozesse können nur stattfinden, wo Gegensätze vorhanden sind; und je stärker die Gegensätze, desto heftiger, je schwächer die Gegensätze, desto sanfter wird der Ausgleich sein. Aber durch den Ausgleichsprozeß selbst werden ja Gegensätze fortwährend gemildert. So sehen wir ein, daß jener Weltprozeß, dessen Tendenz so traurige Perspektiven eröffnet, sich allmählich immer mehr verlangsamt, daß er gegenwärtig jedenfalls schon viel ruhiger geworden ist, als in der Sturm- und Drangperiode der Natur –

*„erst groß und mächtig,  
nun aber geht es weise, geht bedächtig“;*

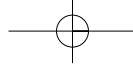
immer weiter wird sich das Tempo dieses Prozesses verlangsamen, und sein Ende liegt in unabsehbarer Ferne. Und für unabsehbare Zeit können auch wir uns, unbeirrt durch ihren länger werdenden Schatten, der Segnungen der Weltherrin erfreuen.

#### LITERATUR

Text mit Kürzungen übernommen aus: Himmel und Erde. Hrsg. v. der Gesellschaft Urania, Berlin, XIV. Jahrgang, Juli 1902, Heft 10, S. 433–520.

Staub - Spiegel der Umwelt / hrsg. von Jens Soentgen und Knut Völzke. - 1. Aufl. . - München : oekom-Verlag, 2006. - 272 Ill. . - ISBN: 3-936581-60-6. - (Stoffgeschichten ; 1) <http://www.oekom.de/buecher/buchreihen/stoffgeschichten/buch/staub>.

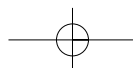
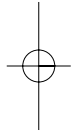
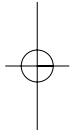
Staub - Spiegel der Umwelt / hrsg. von Jens Soentgen und Knut Völzke. - 1. Aufl. . - München : oekom-Verlag, 2006. - 272 Ill. . - ISBN: 3-936581-60-6. - (Stoffgeschichten ; 1) <http://www.oekom.de/buecher/buchreihen/stoffgeschichten/buch/staub>.



## TEIL II: VOM KOSMISCHEN STAUB ZUR WOLLMAUS:

### REISE DURCH EIN VERSTAUBTES UNIVERSUM

Staub erzählt Geschichten. Denn die Partikel, aus denen er sich zusammensetzt, haben oft weite Reisen hinter sich. Sie sind Tramps, die sich vom Wind oder von anderen Kräften mitnehmen lassen. Ihnen hinterher zu reisen, ist ein Abenteuer, das uns in fremde Welten entführt. Zumindest in der Phantasie kann man sich darauf einlassen. Denn mit modernen analytischen Methoden lassen sich die Reiserouten auch winzigster Partikel rekonstruieren. So können wir die Geschichten hören, die der Staub zu erzählen weiß. Geschichten vom Anfang des Universums, Botschaften aus den Wäldern der Vergangenheit, Erzählungen von glücklichen Stunden, grauem Alltag und von schrecklichen Verbrechen.





Staub - Spiegel der Umwelt / hrsg. von Jens Soentgen und Knut Völzke. - 1. Aufl. . - München : oekom-Verlag, 2006. - 272 Ill. . - ISBN: 3-936581-60-6. - (Stoffgeschichten ; 1) <http://www.oekom.de/buecher/buchreihen/stoffgeschichten/buch/staub>.

## A. STERNENSTAUB UND BLÜTENPOLLEN:

### STAUB DER NATUR

Gegenüber dem von Menschen gemachten Staub ist der natürliche Staub eindeutig in der Übermacht: Etwa 90 Prozent allen Staubes, der durch die Atmosphäre wirbelt, stammt aus natürlichen Quellen. Es ist eine bunte Gesellschaft, die da im Sonnenlicht auf und ab tanzt: Partikel aus dem All, Wüstensande, Vulkanaschen und Insektenbeine und noch vieles mehr ... Und die größte Staubquelle ist sogar feucht: Die Ozeane, die die Luft mit feinem Salz würzen!

THOMAS STEPHAN

## STARDUST MEMORY

### KOSMISCHER STAUB UND DIE METHODEN SEINER ERFORSCHUNG

*Pulvis et umbra sumus*  
(Staub und Schatten sind wir)  
Horaz, 65–8 v. Chr.

Vor etwa 4,6 Milliarden Jahren ist unser Sonnensystem aus einer riesigen interstellaren Gas- und Staubwolke, der so genannten präsolaren Wolke, entstanden. Auch heute noch beobachten Astronomen solche Sternentstehungsprozesse in Wolken interstellarer Materie. Gas und Staub haben sich bei der Entstehung des Sonnensystems schließlich zu größeren Objekten verdichtet.

Zu diesen Objekten zählen, abgesehen von der Sonne selbst, die inneren, so genannten terrestrischen oder erdähnlichen Planeten Merkur, Venus, Erde und Mars, die vorwiegend aus der Staubkomponente der präsolaren Wolke entstanden sind. Weiter außen befinden sich die großen Gasplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun, die neben dem Staub auch in der Lage waren, die flüchtige Gaskomponente zu halten. Die zahlreichen Monde der Gasplaneten hingegen weisen wieder Ähnlichkeiten mit den terrestrischen Planeten auf.

Darüber hinaus gibt es im Sonnensystem eine Vielzahl kleinerer Objekte, wie die Asteroiden und Kometen. Asteroide, die auch gerne als Kleinplaneten bezeichnet werden, haben Größen bis zu 914 Kilometer, wobei nur etwa 140 der mehr als 10.000 bekannten Asteroiden größer als 100 Kilometer sind. Die meisten dieser Objekte findet man im so genannten Asteroidengürtel, einer Region zwischen den Bahnen der Planeten Mars und Jupiter, bei etwa 2,8 astronomischen Einheiten Entfernung von der Sonne. Eine astronomische Einheit (1 AU, *astronomical unit*) entspricht der mittleren

Entfernung zwischen Erde und Sonne und beträgt etwa 150 Millionen Kilometer. Kometen hingegen stammen aus Regionen weiter außen im Sonnensystem, dem *Kuipergürtel* jenseits der Neptunbahn bei 30 bis 1.000 AU und der *Oortischen Wolke* bei 5.000 bis 200.000 AU. Während es sich bei dem Kuipergürtel um ein ringförmiges Reservoir ähnlich dem Asteroidengürtel handelt, muss man sich die Oortsche Wolke als kugelförmige Wolke vorstellen, die unser Sonnensystem umhüllt und seine äußere Grenze darstellt. Der neunte Planet in unserem Sonnensystem, Pluto, wird inzwischen meist als Objekt des Kuipergürtels betrachtet, ebenso die in jüngster Zeit entdeckten Kleinplaneten *Quaoar* und *Sedna*. Wobei letzterer auch aus der Oortischen Wolke stammen könnte und auf seiner stark elliptischen Bahn die innersten Bereiche der Oortischen Wolke mit dem Kuipergürtel verbindet.

#### AM ANFANG WAR DER STAUB

All diese Objekte entstanden, als sich der Staub der präsolaren Wolke durch eine Vielzahl von Zusammenstößen zu immer größeren Objekten vereinigte. Die weitere Geschichte der Objekte hing dabei von zwei wesentlichen Faktoren ab. Zum einen ist dies der Abstand vom Zentralgestirn, der Sonne. Je weiter der Körper von diesem entfernt ist, desto geringer ist die Maximaltemperatur, die er im Laufe seiner Geschichte erfahren hat. Zum anderen ist es die Größe des Körpers. Während kleine Körper eine relativ große Oberfläche haben, über die sie Wärme nach außen hin schnell abgeben können, haben große Körper eine relativ kleine Oberfläche, kühlen somit langsamer ab und heizen daher stärker auf. Als innere Energiequellen stehen den Körpern in der Frühphase des Sonnensystems zwei Prozesse zur Verfügung. Einerseits wird durch das Aufsammeln von Material Bewegungsenergie und Gravitationsenergie in thermische Energie umgewandelt. Andererseits gab es bei der Entstehung des Sonnensystems eine große Anzahl so genannter kurzlebiger radioaktiver Isotope. Am wichtigsten war hier das Aluminiumisotop  $^{26}\text{Al}$ , das mit einer Halbwertszeit von 716.000 Jahren heute *ausgestorben* ist. Bei der Entstehung des Sonnensystems war es aber in so großen Mengen vorhanden, kurz zuvor in anderen Sternen oder Sternexplosionen gebildet worden, dass sein Zerfall als wichtige Wärmequelle zur Verfügung stand. Diese Wärmequellen waren es schließlich, die das Innere großer Körper aufheizten. Kleine Körper,

insbesondere jene weit draußen, blieben hingegen relativ kalt, da sie die Energie schnell nach außen abgeben konnten. Dies ist der Grund, warum für die Erforschung der Frühgeschichte unseres Sonnensystems Asteroiden und noch mehr Kometen von großem Interesse sind. Mit ihnen sollte es möglich sein, die Bausteine des Sonnensystems zu untersuchen. Bei größeren Körpern wurden meist alle Spuren aus dieser Zeit verwischt.

### **STAUB MIT BEGRENZTER HALTBARKEIT**

Obwohl somit am Anfang der Entstehung unseres Sonnensystems bereits eine große Menge Staub vorlag, ist der Staub, der heute auf die Erde fällt, kein direkter Überrest dieser präsolaren Wolke. Staub hat nämlich nur eine begrenzte Lebensdauer im Sonnensystem. Im Gegensatz zu den Planeten, Asteroiden und Kometen ist die Gravitationskraft nicht die alleinige nennenswerte Kraft, die auf die Teilchen wirkt. Kleine Staubteilchen mit Größen kleiner als 1 Mikrometer (tausendstel Millimeter) verlassen unser Sonnensystem bedingt durch den Strahlungsdruck der Sonne. Außerdem wirken hier magnetische Kräfte auf die durch UV-Bestrahlung von der Sonne elektrisch geladenen Teilchen, so dass keine stabilen Bahnen im Sonnensystem möglich sind. Etwas größere Staubteilchen mit etwa 10 Mikrometern Durchmesser hingegen werden durch die Sonnenstrahlung in ihrer Bewegung abgebremst und wandern auf Spiralbahnen Richtung Sonne. Die Sonne betätigt sich hier als riesiger Staubsauger, der die Lebensdauer dieser Partikel auf etwa 10.000 Jahre begrenzt. Für Teilchen, die größer als 100 Mikrometer (0,1 mm) sind, begrenzen Kollisionen mit anderen Partikeln ihre Haltbarkeit ebenfalls auf etwa 10.000 Jahre. Sie fragmentieren zu kleineren Teilchen, deren Lebensdauer dann durch die geschilderten Effekte begrenzt ist.

Diese Zeiten, mögen sie auch im Vergleich zur Lebensspanne eines Staubforschers lang erscheinen, sind doch kurz im Vergleich zu der 4,6 Milliarden Jahre andauernden Geschichte unseres Sonnensystems. Der Staub, aus dem unser Sonnensystem einmal entstanden ist, konnte also nicht in Form kleiner Staubpartikel überleben. Somit muss der Staub, den wir heute im Sonnensystem beobachten und in irdischen Labors untersuchen, durch Prozesse in jüngerer Vergangenheit nachgebildet worden sein. Spuren eines Prozesses, der auch heute noch Staub in unserem Sonnensystem freisetzt, können wir bereits mit einem einfachen Feldstecher beim Anblick des Mondes sehen –

große Krater hervorgerufen durch den Einschlag von Meteoriten. Diese ständigen Einschläge auf der Mondoberfläche führen dazu, dass unser Begleiter von einer mehrere Meter dicken Staub- und Trümmerschicht bedeckt ist.

### **KOLLISIONEN UND DIE RAUMSONDEN DES ARMEN MANNES**

Die Bahnen insbesondere der großen Objekte im Sonnensystem erscheinen uns heute zwar als unveränderlich. Trotzdem waren sie in den letzten 4,6 Milliarden Jahren nicht stabil, sondern haben sich immer wieder gegenseitig gestört. Dabei sind es vor allem die kleinen Objekte, deren Bahnen sich durch den Einfluss der großen Planeten ändern. Dadurch kommt es zu Kollisionen zum Beispiel im Asteroidengürtel, und Bruchstücke der Asteroiden können auf Bahnen geraten, die die Bahn eines Planeten wie der Erde kreuzen.

Dass auch unsere Erde vom kosmischen Bombardement nicht verschont bleibt, belegen große Meteoritenkrater auf unserem Heimatplaneten, wie zum Beispiel das Nördlinger Ries in Süddeutschland. Ja, es gilt inzwischen als erwiesen, dass das große Artensterben, dem vor 65 Millionen Jahren auch die Dinosaurier zu Opfer gefallen sind, durch ein solches kosmisches Ereignis ausgelöst wurde. Anfang der 1980er Jahre waren es zunächst nur Indizien, die für eine extraterrestrische Ursache für die durchgreifenden Veränderungen sprachen, die den Übergang von der Kreidezeit zum Tertiär markieren. So wurde eine Anreicherung des seltenen Metalls Iridium in entsprechenden Erdschichten gefunden, ein Element, das in Meteoriten viel häufiger als in der Erdkruste vorkommt. Später fand man weitere Hinweise, wie Minerale, die eindeutig durch den Einschlag eines großen Meteoriten verändert worden waren. Inzwischen hat man schließlich den Einschlagskrater an der Küste der mexikanischen Halbinsel Yukatan gefunden, den etwa 180 Kilometer großen Krater *Chicxulub*, dessen Entstehungsalter von 65 Millionen Jahren exakt zur Kreide-Tertiär-Grenze passt.

Die Erde war in ihrer Vergangenheit sicherlich dem kosmischen Beschuss in ähnlicher Weise ausgesetzt wie der Mond. Sie sollte sogar aufgrund ihrer größeren Masse und größeren Oberfläche mehr Meteoriten eingefangen haben als ihr Begleiter. Dass das Bild der Erdoberfläche nicht in ähnlicher Weise von diesen Einschlägen geprägt ist, hat mehrere Ursachen. Einerseits führt die schützende Atmosphäre zu

einem Abbremsen der kleineren Meteorite, so dass sie praktisch keinen Schaden mehr anrichten, wenn sie mit 200 bis 300 Stundenkilometern die Erdoberfläche erreichen. In mehr als 70 Prozent der Fälle besteht diese Oberfläche zudem aus Wasser, so dass hier keine Spuren zurück bleiben können. Andererseits ist die Oberfläche der Erde im Gegensatz zur Mondoberfläche ständigen Veränderungen ausgesetzt. Geologische Prozesse wie Plattentektonik oder Sedimentation führen zu einer effektiven Verwischung der Einschlagsspuren. So blieb auch der Chicxulub-Krater lange Zeit unentdeckt, da er unter einer dicken Sedimentschicht begraben liegt.

Glücklicherweise sind diese großen Einschläge mit ihren globalen Auswirkungen extrem selten, wenn auch ein gewisses Restrisiko bleibt, das gerne von der Unterhaltungsindustrie Hollywoods aufgegriffen wird. Häufiger hingegen sind die Einschläge kleinerer Meteorite, die weniger Schaden anrichten und außer bei Wissenschaftlern nur bei direkten Beobachtern eine gewisse Euphorie auslösen. Berichte über solche Ereignisse finden sich hin und wieder in der Tagespresse oder in den Nachrichtensendungen, erlangen aber meist wenig Beachtung.

Weniger spektakulär, aber aus wissenschaftlicher Sicht mindestens ebenso interessant, ist der Einfall kosmischer Materie in Form von Staub. Dieser interplanetare Staub bildet den Löwenanteil der 10.000 bis 40.000 Tonnen Material, die pro Jahr auf unsere Erde fallen. Staubteilchen, genau wie die größeren Meteorite, liefern uns Informationen über ihre so genannten Mutterkörper, also die Objekte im Sonnensystem, von denen sie stammen. Auch wenn der Staub, wie bereits erwähnt, vor nicht viel mehr als 10.000 Jahren aus seinem Mutterkörper herausgeschlagen worden sein kann, so sind die meisten dieser Mutterkörper vor 4,6 Milliarden Jahren entstanden, und es ist möglich, mit Hilfe des Staubs etwas über diese Entstehung zu lernen.

Meteoriten und kosmischer Staub stellen neben den Mondproben, die von den amerikanischen Apollo- und den russischen Luna-Missionen zur Erde gebracht wurden, die bisher einzige Quelle für extraterrestrisches Material in den Forschungslabors dar. Aufgrund der einfachen Verfügbarkeit der Meteoriten – man muss sie nur finden – werden sie auch die *Raumsonden des armen Mannes* genannt.

### KOMETENSTAUB – BAUSTEIN DES LEBENS

Während, abgesehen von einigen wenigen Meteoriten vom Mond und Mars, fast alle Meteoriten von Asteroiden stammen, kommen als Mutterkörper für interplanetare Staubteilchen neben Asteroiden auch Kometen in Frage. Wenn Kometen ins innere Sonnensystem gelangen, sich also dem Zentralgestirn annähern, bilden sie ihre spektakulären Schweife aus, die aus Staub und ionisiertem Gas bestehen. Hier wird somit eine weitere Quelle für die Staubproduktion im Sonnensystem augenfällig.

Kometen haben sich, wie bereits erwähnt, die meiste Zeit seit ihrer Bildung weit draußen im äußeren Sonnensystem aufgehalten. Es handelt sich bei ihnen vermutlich um die ursprünglichste Materie, derer wir im Sonnensystem habhaft werden können, denn in diesen kalten Regionen des Sonnensystems konnten selbst flüchtige Bestandteile kondensieren und sind deshalb nicht wie bei den meisten Asteroiden weitgehend verlorengegangen. Kometares Material sollte somit den Bausteinen am ähnlichsten sein, aus denen unser Sonnensystem entstanden ist.

Die Forschung hat zum besseren Verständnis der Quellen beigetragen, aus denen die Bausteine unseres Sonnensystems und auch letztlich wir entstanden sind. Dabei handelt es sich um die unterschiedlichsten Sterntypen, die insbesondere in der Spätphase ihrer Entwicklung die Elemente bilden, ohne die unsere Existenz nicht möglich wäre. Staub ist hierbei ein wesentlicher Bestandteil des Materiekreislaufs. Aus ihm werden Sterne geboren, und zu ihm werden sie wieder am Ende ihres Lebens.

Auch für die Entwicklung des Lebens auf der Erde und eventuell auch auf anderen Himmelskörpern könnte Staub eine wichtige Rolle gespielt haben. So beinhaltet Kometenstaub organische Verbindungen, die auch als Bausteine des Lebens gedient haben könnten. Es gibt sogar eine Theorie, die besagt, dass das Leben durch Staub von einem Himmelskörper zum anderen getragen wird und auch so auf unsere Erde gelangt ist. Diese als Panspermielehre bezeichnete Theorie wurde in den 1970er Jahren von dem britischen Astronomen, Mathematiker und Science-Fiction-Autor Fred Hoyle und seinem sri-lankischen Kollegen Chandra Wickramasinghe aufgestellt, ist aber nach wie vor heftig umstritten. Gesichert ist jedenfalls, dass in den großen Gas- und Staubwolken des interstellaren Mediums organische Verbindungen vorliegen, deren Überreste man in kosmischen Staubteilchen im Labor analysieren kann.



Die Erkenntnis, dass Staub in unserem Sonnensystem vorhanden ist, geht auf den italienisch-französischen Gelehrten Giovanni Domenico Cassini (1625–1712) zurück, der bereits im Jahr 1683 erkannte, dass das sogenannte Zodiakallicht durch Streuung des Sonnenlichts an Staubteilchen in der Ebene des Tierkreises (Zodiakus, griech. Tierkreis) entsteht. Man kann diese kegelförmige Erhellung des Himmels über der Aufgangs- bzw. Untergangsstelle der Sonne beobachten, im Frühjahr kurz nach Sonnenuntergang im Westen und im Herbst kurz vor Sonnenaufgang im Osten, auch wenn die Beobachtung aufgrund der allgemeinen Verschmutzung der Luft und durch die störende Beleuchtung der Städte heute sicher ungleich schwieriger ist als zu Cassinis Zeiten.

### JÄGER UND SAMMLER IN DER STRATOSPÄRE

Treten Staubteilchen in die Erdatmosphäre ein, werden sie meist so stark abgebremst, dass sie vollständig verdampfen. Immerhin beträgt ihre Geschwindigkeit beim Atmosphäreneintritt mindestens elf Kilometer in der Sekunde. Dabei werden die in der oberen Atmosphäre befindlichen Gase zum Leuchten angeregt. Diese Lichterscheinung wird als *Meteor* oder *Sternschnuppe* bezeichnet. In manchen Fällen, insbesondere bei sehr kleinen Teilchen, die die auftretende Hitze schnell abgeben können, verdampfen die Partikel aber nicht vollständig. Sie werden nur stark abgebremst und sinken dann langsam zu Boden.

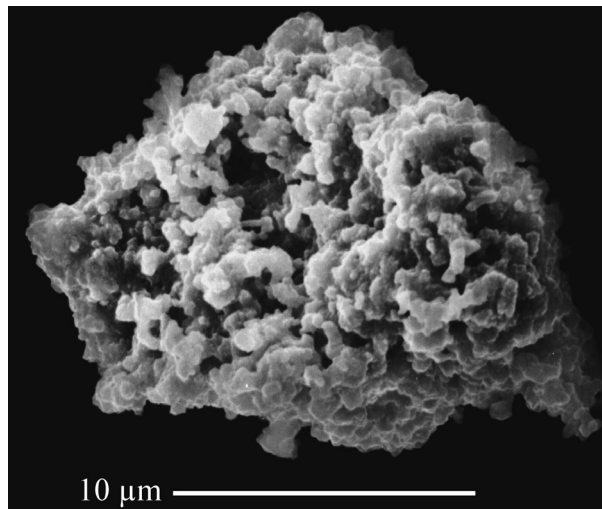
Dieser Staub ist auf unserer Erde allgegenwärtig und auch auf diesem Buch befindet sich sicherlich das ein oder andere kosmische Staubteilchen. Die Schwierigkeit besteht jedoch darin, diesen Staub zu finden und eindeutig vom *normalen* Hausstaub zu trennen.

Die Idee, interplanetaren Staub gezielt zu suchen und für die Forschung verfügbar zu machen, wurde daher erst dreihundert Jahre nach Cassini verwirklicht. Der amerikanische Wissenschaftler *Donald E. Brownlee* schlug im Jahre 1976 vor, Staub in der Stratosphäre einzusammeln. Nach ersten Ballonexperimenten setzt die amerikanische Weltraumagentur NASA seit 1981 Flugzeuge ein, die in der Stratosphäre bei 20 Kilometer Höhe Staub einsammeln.

In diesen Höhen ist die Luft extrem sauber. Während in tieferen Schichten irdischer Staub die Jagd nach den kosmischen Staubteilchen zur Suche nach der Stecknadel im Heuhaufen werden lässt, liegt hier die Erfolgsquote bei bis zu 50 Prozent. Neben den interplanetaren Staubteilchen findet man zwar in 20 Kilometer Höhe immer noch Partikel, die aus Luft- und Raumfahrt stammen oder sogar Vulkana-

sche, es ist jedoch meist möglich, die Teilchen aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung diesen Quellen eindeutig zuzuordnen.

Das Sammeln der Teilchen ist vergleichsweise einfach. Hierzu werden Plexiglasscheiben mit Größen von 30 bzw. 300 Quadratzentimeter verwendet, die mit einem zähflüssigen Silikonöl beschichtet sind. Sie werden unterhalb der Flügel der für den Einsatz in diesen Höhen spezialisierten (Aufklärungs-)Flugzeuge in den Luftstrom gehalten. Bei geringeren Höhen sind diese *Staubfänger* hermetisch von der Außenwelt abgeschlossen. Bei den kleinen Kollektoren (30 cm<sup>2</sup>) erhält man pro Stunde Exponierungszeit etwa 1 bis 2 Teilchen kosmischer Herkunft mit einem Durchmesser größer als 10 Mikrometer.



Typische Exponierungszeiten, die sich in mehreren Flügen eines Kollektors ergeben, liegen bei 20–80 Stunden.

Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines interplanetaren Staubteilchens (© Thomas Stephan). Diese Aufnahme wurde vom Autor bei einem Forschungsaufenthalt in den Labors der NASA gemacht. Obwohl dieses Staubkorn so klein ist, dass es mit bloßem Auge nicht erkannt werden kann, birgt es doch eine Fülle von einzigartigen Informationen. Deshalb war dieses Korn auch Gegenstand zahlreicher Untersuchungen (mindestens neun verschiedene Analysen mit sieben unterschiedlichen Methoden), die zwischen 1994 und 2000 in Houston (Texas), Heidelberg, Münster und Halle durchgeführt wurden. An diesen Arbeiten waren elf Wissenschaftler aus Deutschland, den USA und Japan beteiligt.

Zurück auf der Erde, wird die kosmische Beute von Wissenschaftlern in den hochreinen Labors der NASA in Augenschein genommen. Zunächst muss sie vom Silikonöl befreit werden. Es hat seinen Zweck

erfüllt, die Haftung der Teilchen an den Plexiglasscheiben zu erleichtern und sie von Umwelteinflüssen wie Feuchtigkeit in niedrigen Luftschichten zu schützen. Um die Teilchen vom Silikonöl zu befreien, werden sie in einem Strom des Lösungsmittels Hexan gewaschen, wobei die Kunst darin besteht, die Partikel, die eine typische Größe von nur einem hundertstel Millimeter haben, nicht zu verlieren. Man muss sich hierbei ähnlicher Reinräume bedienen wie zum Beispiel in der Halbleiterindustrie, damit eine Vermischung des kosmischen Staubs mit dem *gemeinen Hausstaub* vermieden wird.

Auch wenn die Handhabung der Partikel nicht immer einfach ist, so kann doch in der heutigen Zeit eine Vielzahl unterschiedlichster Analysen an ein und demselben Staubteilchen durchgeführt werden. Diese Analysen liefern Informationen über die chemischen, physikalischen und mineralogischen Eigenschaften der Teilchen und ihrer oft nur Bruchteile eines Mikrometers großen Bausteine. Die Staubteilchen sind nämlich meist nicht homogen aufgebaut, sondern bestehen aus den unterschiedlichsten Komponenten.

Die Untersuchungen werden an verschiedenen Instituten auf der ganzen Welt durchgeführt, denen die Teilchen hierfür von der NASA zur Verfügung gestellt werden, in Deutschland zum Beispiel am Institut für Planetologie der Universität Münster.

Auch wenn die vielen Tausend Staubteilchen, die in der Stratosphäre gesammelt wurden noch nicht mal einen Stecknadelkopf füllen würden, hat ihre Untersuchung das Wissen über ihre Mutterkörper und die Entstehung des Sonnensystems als Ganzes entscheidend erweitert. Voraussetzung hierfür waren und sind technische Entwicklungen, die eine Untersuchung solch kleiner Proben erst ermöglichen.

Dabei sind insbesondere die Teilchen von großem Interesse, die vermutlich von Kometen stammen. Von ihnen kann man lernen, woraus unser Sonnensystem vor langer Zeit entstanden ist. Besonders interessant sind dabei bestimmte Bausteine, die Informationen über die Zeit vor der Entstehung des Sonnensystems tragen.

### **ÄLTER ALS DAS SONNENSYSTEM – DIAMONDS ARE FOREVER**

Der Staub, aus dem sich unser Sonnensystem vor 4,6 Milliarden Jahren bildete, hat seinen Ursprung in unterschiedlichen Sternprozessen vor dieser Zeit. So wurden praktisch alle Elemente außer Wasserstoff und große Teile des Heliums, die schon kurz nach dem Urknall gebildet wurden, in den gigantischen Fusionsreaktoren der Sterne erzeugt.

Am Ende eines Sternlebens werden nun diese Elemente in die Umgebung, das interstellare Medium, freigesetzt. Dies kann durch Sternwinde oder das Absprenge einer äußeren Hülle geschehen, aber manchmal auch in der gigantischen Explosion einer Supernova, die einen Stern so hell wie eine ganze Galaxie erscheinen lässt. Die nicht flüchtige Materie kondensiert schließlich zu Staubkörnern, woraus neue Sternsysteme entstehen können.

Bei der Entstehung unseres Sonnensystems wurde der Staub von einer Vielzahl von Sternen und Sternenerationen so gut durchmischt, dass Informationen über die einzelnen stellaren Quellen verloren gegangen sind. Eine Ausnahme macht hier der so genannte *präsolare* Staub, der diese Informationen auch heute noch in Form von außergewöhnlichen Isotopenverhältnissen trägt. Diese präsolaren Körner wurden in den späten 1980er Jahren zunächst in primitiven Meteoriten gefunden. Die Asteroiden, von denen sie stammen, waren in der Lage, diesen Staub zu konservieren. Es handelt sich dabei auch um Material, das sowohl chemisch als auch thermisch nur sehr schwer angreifbar ist. Die häufigsten präsolaren Minerale sind Diamant, Siliziumkarbid (SiC) und Graphit. Nun sollten aber gerade diese Minerale eher selten gebildet worden sein. Viel häufiger werden Silikate erwartet, aus denen auch die meisten Gesteine auf unserer Erde, die überwiegende Zahl der Meteorite und auch der kosmische Staub vorwiegend aufgebaut sind. Staub aus Silikaten konnte aber die Entstehung des Sonnensystems wohl nicht überstehen und hat sich daher sehr gut durchmischt.

Eine Ausnahme scheinen hier einige interplanetare Staubteilchen zu bilden. In ihnen wurden zu Beginn des neuen Jahrtausends präsolare Silikate gefunden. Man hat hier Staub, vermutlich von Kometen, vorliegen, der einzelne Partikel beinhaltet, die in den Atmosphären früherer Sterne oder im interstellaren Raum kondensierten.

Das Besondere an dieser Art der *astrophysikalischen* Staubforschung ist, dass es hierdurch erstmals möglich wurde, Materie von Sternen direkt im Labor zu untersuchen. Während die Astronomie sonst nur die elektromagnetische Strahlung, insbesondere das Licht, weit entfernter Objekte mit ihren Teleskopen untersuchen kann, rückt man dem *Sternenstaub* mit den modernsten Elektronenmikroskopen und Massenspektrometern zu Leibe. Dabei geht die Zusammenarbeit mit den Astrophysikern heute so weit, dass einerseits die planetologischen Staubforscher von den Astrophysikern erfahren können, welche Sterntypen als Geburtsorte ihrer Staubkörner in Frage kommen,

andererseits die Astrophysiker durch die Laboruntersuchungen Details über Sternprozesse erfahren können, die sich einer astronomischen Beobachtung sonst entziehen.

### LEICHTER ALS LUFT UND DOCH FEST – DIE MISSION STARDUST

Abgesehen vom Sammeln kosmischer Staubteilchen in der Stratosphäre, liegt es natürlich nahe, Staubteilchen direkt im Weltall einzufangen. Doch dies ist ungleich schwieriger und war bis vor kurzem praktisch unmöglich. Aufgrund der hohen Relativgeschwindigkeiten verdampfen Staubteilchen nämlich vollständig, wenn sie auf ein festes Hindernis wie eine Raumsonde treffen. Zum Einfangen der Staubteilchen im Weltall, benötigt man daher ein Medium zum sanften Abbremsen. Bei den Teilchen, die in der Stratosphäre eingesammelt werden, dienen dazu die obersten Luftschichten. Im Weltall kann man hierfür ein Material verwenden, das den Namen *Aerogel* trägt. Es handelt sich hierbei um einen Festkörper aus Siliziumdioxid, der eine extrem geringe Dichte hat. Obwohl chemisch ähnlich aufgebaut, liegt seine Dichte um einen Faktor 1.000 unter der von Glas. Ja, es ist inzwischen sogar gelungen, Aerogel herzustellen, das leichter als Luft ist. In diesem aus netzartigen Strukturen aufgebauten Festkörper, der hier auf der Erde zu 99,8 Prozent aus Luft und im Weltall entsprechend aus Vakuum besteht, ist es nun möglich, Teilchen mit Geschwindigkeiten von einigen Kilometern pro Sekunde innerhalb weniger Millimeter abzubremesen, ohne sie dabei vollständig zu zerstören.

Am 7. Februar 1999 hat sich die mit einem Staubfänger aus Aerogel bestückte amerikanische Raumsonde *Stardust* auf den Weg zum Kometen *Wild 2* gemacht, den sie am 2. Januar 2004 in einer Entfernung von 236 Kilometern passierte. Der dort aufgesammelte Kometenstaub wird voraussichtlich am 15. Januar 2006 sicher verpackt in einer Kapsel, von Fallschirmen gebremst in der Wüste des US-Bundesstaats Utah landen. Dies wird dann der erste Kometenstaub in unseren Labors sein, dessen Herkunftsort eindeutig bekannt ist. Er wird sicher zum Verständnis dieser noch immer in mancher Hinsicht rätselhaften Himmelskörper beitragen, die seit jeher die Aufmerksamkeit der Menschen erregt haben.

### LITERATUR

GRÜN Eberhard, Bo Å. S. GUSTAFSON, Stan DERMOTT und Hugo FECHTIG (Ed.): *Interplanetary Dust*. Berlin 2001.

MARTIN EBERT

## DICKE LUFT

### STAUB IN UNSERER ATMOSPHERE

Die Umweltmedien Erde, Wasser und Luft, die auf den ersten Blick gut getrennt erscheinen, sind in Wahrheit viel stärker durchmischt, als man meint. So ist die feste Gesteinhülle der Erde (Lithosphäre), die wir unter unseren Füßen spüren, gar nicht so fest, wie wir immer denken. Sie ist lediglich 50 bis 150 Kilometer dick und schwimmt auf der sich darunter befindlichen fließfähigen Schicht des Erdmantels, der Asthenosphäre, die zum Teil aufgeschmolzen ist. Hierauf beruht das Grundprinzip der Plattentektonik. Dass nicht die gesamte Erde erstarrt ist, wird uns bei Vulkanausbrüchen vor Augen geführt.

Auch unsere Atmosphäre ist alles andere als ein simples Gasgemisch, welches uns umgibt. Will man viele der ungeheuer komplexen Vorgänge in unserer Atmosphäre verstehen, muss man die Atmosphäre als das betrachten, was sie wirklich ist – ein komplexes Mehrkomponentensystem von gasförmigen, festen und flüssigen Komponenten, das man sich als großen Reaktionskessel vorstellen kann.

So befinden sich in der Atmosphäre auch große Mengen Wasser, die zum Teil flüssig (als Wolkentropfen oder Regentropfen, zum Teil fest) als Eiskristalle, Hagel, Schneeflocken, vor allem aber als Wasserdampf in unserer Atmosphäre vorliegen. Je nach Luftfeuchte stellt das Wasser zwischen 1 und 5 Prozent der atmosphärischen Gesamtmasse.

Natürlich stellen die gasförmigen Komponenten mit Abstand den Großteil der atmosphärischen Masse. Bezieht man sich auf „trockene“ Luft, so stellen die drei Gase Stickstoff (78 %), Sauerstoff (21 %) und Argon (0,9 %) zusammen alleine ca. 99,9 Prozent der Gesamtmasse. Allerdings ist heute allgemein bekannt, welche Auswirkungen auch steigende Konzentrationen von Spurengasen in unserer Atmosphäre für uns haben. So führt der anthropogen verursachte Anstieg von

Spurengasen wie Kohlendioxid, Methan, Ozon, FCKWs, Stickoxide, Schwefeloxide etc. zu vielen aktuell stark diskutierten Effekten wie Treibhauseffekt, Ozonloch, Sommerozonsmog oder sauren Regen.

### ATMOSPHERISCHE AEROSOLPARTIKEL

Führt man sich dies vor Augen, ist es vielleicht nicht mehr so verwunderlich, dass einer dritten atmosphärischen Komponente, die nur in scheinbar verschwindend geringen Anteilen in unserer Atmosphäre vorliegt, eine ebenso große Bedeutung zukommt – den „Staubpartikeln“:

Staubpartikel sind klein und leicht genug, dass auch sie luftgetragen in der Atmosphäre existieren können. Mit ca. 1–100 µg Staub pro Kubikmeter Luft stellen die Staubpartikel lediglich ca. 0,0000001 bis 0,00001 Prozent der atmosphärischen Gesamtmasse.

In der Wissenschaft nennt man eine stabile Mischung fester und flüssiger Partikel in einem Gas „Aerosol“. Nach dieser Definition stellt unsere gesamte Atmosphäre ein großes Aerosol dar und die darin enthaltenen Staubpartikel bezeichnet man als „atmosphärische Aerosolpartikel“. Um Verwirrung zu vermeiden, sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass im allgemeinen Sprachgebrauch oftmals nur die festen Aerosolpartikel gemeint sind, wenn allgemein von „Aerosol“ die Rede ist.

Die Größe der Aerosolpartikel reicht von einem Nanometer (ein Millionstel Millimeter) bis zu mehreren Mikrometern (1.000.000 nm = 1000 Mikrometer = 1 Millimeter), also über gut vier Größenordnungen. Selbst die „großen“ Aerosolpartikel sind hierbei so klein, dass das menschliche Auge sie direkt nicht mehr wahrnehmen kann (die Auflösung des menschlichen Auges beträgt ca. 20 µm). Um kleinere Aerosolpartikel sichtbar zu machen benötigt man schon ein Rasterelektronenmikroskop, und bei den kleinsten Partikeln stößt auch dieses an seine Grenzen.

Eine Vorstellung wie klein Aerosolpartikel wirklich sind, liefern die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in Abbildung 1. Das in Bild B gezeigte Staubpartikel ist auf der 2 mm großen Stechmücke in Bild A trotz mehr als 100-facher Vergrößerung gar nicht zu erkennen, obwohl es sich hierbei um einen Riesen unter den Staubpartikeln handelt. Die Hauptanzahl aller Staubpartikel ist noch einmal ca. 100-fach kleiner.

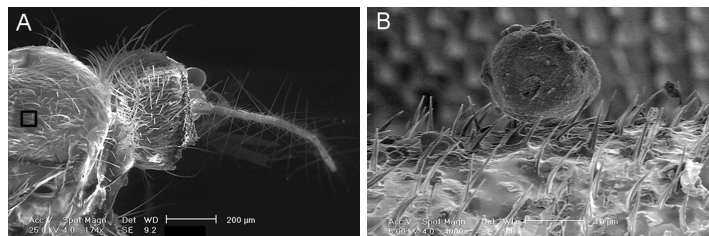


Abb. 1: A) eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer ca. 2 mm großen Stechmücke. (B) Die Vergrößerung des in A eingezeichneten Bildausschnittes zeigt einen an der Mücke anhaftenden ca. 10 µm großen Staubpartikel.

Größer sind Wolkentropfen und Eiskristalle mit 10 bis 100 Mikrometer sowie Regentropfen, Schneeflocken und Hagel, die mit einer Größe von mehreren Millimetern so groß und schwer sind, dass sie aus der Atmosphäre ausregnen und zu Boden fallen.

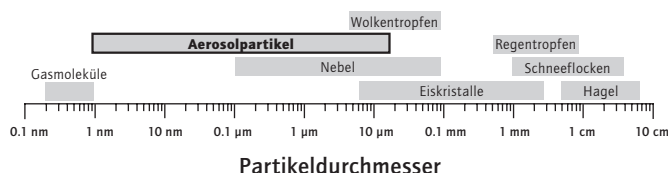


Abb. 2: Logarithmische Darstellung des typischen Größenbereiches von flüssigen und festen Aerosolpartikeln in der Atmosphäre.

## DIESELRUSS UND SEESALZ – QUELLEN UND KONZENTRATIONEN VON AEROSOLPARTIKELN

Im Gegensatz zu den Konzentrationen der gasförmigen Moleküle in der Atmosphäre ist die Konzentration der Aerosolpartikel an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Zeiten sehr unterschiedlich.

Dies kommt daher, dass die Aerosolpartikel in der untersten Schicht der Atmosphäre, der Troposphäre, nicht sehr lange verbleiben. Kleine Partikel ( $< 0,1 \mu\text{m}$ ) lagern sich in der Troposphäre sehr schnell mit anderen Partikeln zusammen und wachsen, während große Partikel ( $> 1 \mu\text{m}$ ) aufgrund ihrer Masse sehr schnell ausfallen. Lediglich für Partikel mittlerer Größe ( $0,1 - 1 \mu\text{m}$ ) gibt es keinen effektiven trockenen Entfernungsmechanismus, wodurch diese Teilchen oftmals mehrere Wochen in der Troposphäre verbleiben, bis sie mit einem Regenereignis ausgewaschen werden.

Nur wenn Staubpartikel in sehr große Höhen gelangen, wie z. B. durch einen Sandsturm in der Wüste oder bei einem Vulkanausbruch,



können auch sehr große Partikel wochenlang in der Atmosphäre verbleiben und in dieser Zeit über den ganzen Erdball transportiert werden. So ist nicht selten ein Sandsturm in der Sahara die Ursache für einen Staubfilm, den man in Mitteleuropa einige Tage später auf dem Auto vorfindet. Aber selbst eine Verweilzeit von einigen Wochen ist zu gering, um eine gleichmäßige Vermischung der Aerosolpartikel über die ganze Erde zu bewerkstelligen. Hierfür wäre eine Verweilzeit von einigen Jahren erforderlich.

Aus diesem Grund sind die Konzentrationen von Aerosolpartikeln immer stark abhängig von der direkten lokalen Umgebung und den dort vorhandenen Partikelquellen. In der Stadt werden typischerweise 100.000 Partikel pro Kubikzentimeter Luft (ca.  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) gemessen, direkt neben einer Hauptstraße auch bis zu zehnmal mehr. Auf dem Land findet man noch ca. 10.000 Partikel/ $\text{cm}^3$  (ca.  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), über den Ozeanen weniger als 1000 Partikel/ $\text{cm}^3$  (ca.  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) und in polaren Regionen oftmals weniger als 100 Partikel/ $\text{cm}^3$  ( $< 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Bei Partikeln unterscheidet man zwischen primären und sekundären Partikeln. Primäre Partikel sind direkt emittierte Partikel. Sekundäre Partikel (Abb. 3A) dagegen entstehen durch luftchemische Prozesse aus gasförmig emittierten Vorläufersubstanzen, z.B. Ammoniak, Schwefeldioxid, Stickstoffoxide oder organischen Verbindungen. In der nächsthöheren Schicht der Atmosphäre, der Stratosphäre, die bei ca. 10 Kilometer Höhe beginnt, findet man nur noch wenige primäre Partikel. Im Gegensatz zur Troposphäre können Partikel, die einmal in die Stratosphäre gelangt sind, dort sehr lange verweilen. Dies ist auch der Grund, warum Partikel aus Vulkaneruptionen über Monate rund um den Globus verfolgt werden können und warum die Emissionen von sehr hoch fliegenden Überschallflugzeugen als besonders kritisch eingestuft werden, da in diesen Höhen emittierte Partikel nur sehr langsam wieder aus der Atmosphäre entfernt werden.

Der Mensch produziert aber vor allem am Boden eine große Anzahl von kleinen primären Partikeln durch Verbrennungsprozesse. So geben Dieselkraftfahrzeuge, aber auch Gas- oder Ölheizungen, Rußpartikel (Abb. 3B), welche in Verdacht stehen, Krebs zu erzeugen, in hoher Anzahl an die Umwelt ab. Aber auch die Industrie emittiert viele unterschiedliche Partikel. Typisch für diese Gruppe sind die kugelförmigen Flugaschen (Abb. 3E), die bei der Abkühlung von geschmolzenen mineralischen oder metallischen Bestandteilen in Hochtemperaturprozessen entstehen.

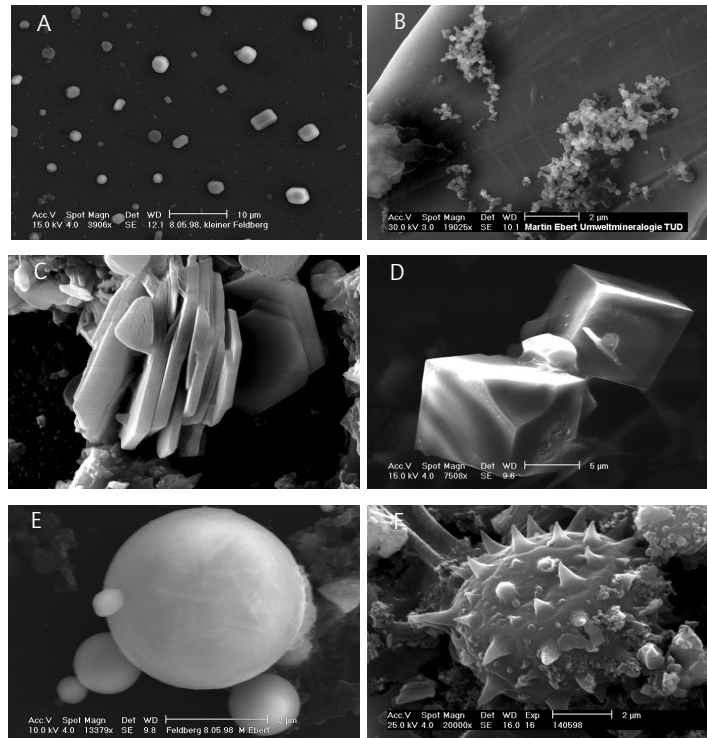


Abb. 3: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von verschiedenen Aerosolpartikeln: (A) sekundäres Aerosol (Ammoniumsulfat); (B) Dieselruß; (C) Bodenaustaubpartikel; (D) Seesalz; (E) Industriestaub (Eisenoxid-Flugasche); (F) biologisches Partikel (Pilzspore). Alle diese Partikel wurden an einer Partikelmessstation auf dem Feldberg bei Frankfurt am Main gesammelt. Der Feldberg ist ein beliebtes Ausflugsziel im Taunus.

Primäre Partikel, die durch Abrieb oder Aufwirbelung entstehen, stammen meist aus natürlichen Quellen. Sie gelangen zwar in weit geringerer Anzahl in die Atmosphäre, sind aber deutlich größer (meist  $> 2 \mu\text{m}$ ) und tragen damit häufig genauso viel oder mehr zur Gesamtmasse der Aerosolpartikel bei. Daher besitzen je nach Fragestellung oftmals ganz unterschiedliche Komponenten der Aerosolpartikel eine große Bedeutung. Untersucht man Auswirkungen von Aerosolpartikeln, die von der Anzahl der Partikel abhängig sind, spielen vor allem die vielen kleinen Partikel die entscheidende Rolle, z. B. die anthropogenen Partikel aus Verbrennungsprozessen. Untersucht man dagegen Auswirkungen von Aerosolpartikeln, die von der Masse der Partikel abhängig sind, sind oftmals die wenigen aber schweren großen Partikel entscheidend, z. B. Bodestäube.

Die Aufwirbelung von Bodenstaub (Abb. 3C), also die Erosion von Boden durch Wind, ist der häufigste natürliche Bildungsprozess von Aerosolpartikeln. Bei diesem Prozess spielt auch der vielfältige Eingriff des Menschen in die natürlichen Bodenflächen eine wichtige Rolle. Durch die Versiegelung oder Betonierung von großen Flächen, das Abholzen von Wäldern oder das Trockenlegen von Wasserflächen verändert der Mensch die Bodenbeschaffenheit und damit den Grad der Staubentstehung. Desweiteren trägt er auch aktiv durch den Personen- und Industrieverkehr an der Aufwirbelung des Staubes bei.

Rund drei Viertel unseres Planeten sind von Wasser bedeckt. Es mag zunächst erstaunlich klingen, aber auch die Ozeane sind eine wichtige Partikelquelle. Beim Zerplatzen von Luftblasen, die sich in Wellenkämmen bilden, gelangen Seesalztröpfchen in die Atmosphäre, die als teilweise oder vollständig abgetrocknete Seesalzpartikel (Abb. 3D) dann tief ins Inland transportiert werden können.

Eine weitere wichtige Partikelgruppe sind alle Arten von biologischen Partikeln wie Viren, Bakterien, Sporen (Abb. 3F), Pollen oder Pflanzenbruchstücke. Viele Bakterien und Viren nutzen den Effekt sich luftgetragen über weite Strecken transportieren zu lassen, genauso wie viele Pflanzen ihre Samen oder Pollen zum Zwecke der Vermehrung losschicken, worunter viele Allergiker sehr zu leiden haben.

Es gelangen auch Partikel von außerhalb der Erde in unsere Atmosphäre. Diese extraterrestrischen Stäube spielen für die Gesamtmasse des Aerosols keine Rolle, allerdings ist es möglich, diese Partikel in der Stratosphäre zu sammeln. Aus ihrer Analyse kann man einiges über unser Sonnensystem und die ursprüngliche Entstehung der Materie lernen.

In Abbildung 4 sind die geschätzten weltweiten Partikelemissionen in Millionen Tonnen pro Jahr angegeben. Nach dieser Darstellung könnte man den Eindruck gewinnen, dass die vom Menschen verursachten Partikelemissionen (Industrie und Verkehr) keine große Bedeutung besitzen. Das ist aber falsch. Da die meisten anthropogen emittierten Partikel viel kleiner sind als z. B. Meersalz oder Bodenstaub, bleiben diese Partikel auch viel länger in der Atmosphäre, wodurch sich die reale atmosphärische Konzentration der anthropogenen Partikel stark gegenüber dem emittierten Anteil erhöht. Darüber hinaus besitzen viele der vom Menschen emittierten Partikel chemische und physikalische Eigenschaften, die diese Partikel für viele Prozesse um ein vielfaches wirkungsvoller machen als

natürliche Partikel. Dies verhält sich ähnlich wie z. B. bei dem Treibhauseffekt. Hier besitzt z. B. ein Molekül des Fluorchlorkohlenwasserstoffs F12 eine bis zu 8.000-mal größere Treibhauswirkung als ein Molekül Kohlendioxid.

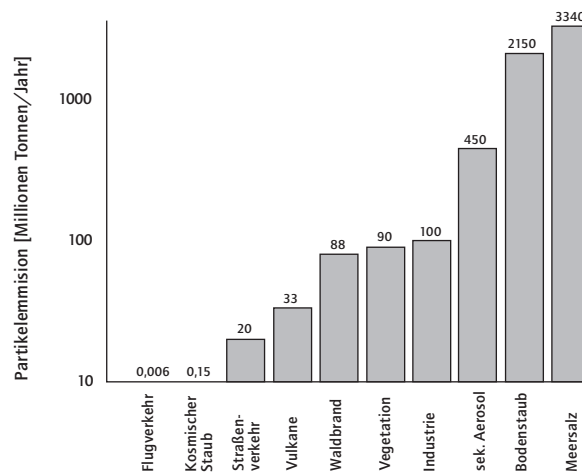


Abb. 4: Weltweite geschätzte Partikelemission in Millionen Tonnen pro Jahr der nach Masse wichtigsten Partikelquellen. Bei den Werten handelt es sich um geschätzte Werte; die mögliche Spanne kann für einige Quellen sehr groß sein, z. B. für vulkanische Emissionen schwanken die Schätzwerte je nach Autor zwischen 4 und 10.000 Tonnen/Jahr.

## EINFLUSS AUF WASSERKREISLAUF UND CHEMIE DER ATMOSPHERE

Aerosolpartikel sind ein wesentlicher Faktor im globalen Wasserkreislauf unseres Planeten indem sie als Kondensationskern für Eiskristalle sowie Wolken- und Nebeltröpfchen dienen.

Die Tropfen bzw. Eispartikelbildung können sehr viel einfacher ablaufen, wenn beim Bildungsprozess eine feste Oberfläche vorhanden ist, die in der Atmosphäre nur die Aerosolpartikel liefern können. Stark vereinfacht kann man sagen, dass praktisch jeder Regentropfen oder jede Schneeflocke, die auf den Boden fällt, auf der Oberfläche eines Aerosolpartikels entstanden ist. Die Aerosolpartikel sind für die gesamte Chemie der Atmosphäre essentiell, da die Oberfläche, die sie bieten, nicht nur für die Tropfen- und Eiskristallbildung notwendig

sind, sondern auch eine Reihe spezieller chemischer Reaktionen befördern. So sind Partikel beteiligt an der Katalyse von ozonzerstörendem Chlorgas in der Stratosphäre, an der Oxidation verschiedenster organischer Verbindungen oder an der Bildung organischer und anorganischer Säuren.

Ebenso werden durch die Aerosolpartikel große Stoffmengen rund um den Globus transportiert. Mineralstaub aus der Sahara z. B. gilt als der wichtigste Eintrag von Eisen in den Ozean. Dies ist von besonderer Bedeutung, da weite Regionen des Ozeans unter einem Mangel des Spurenmetalls Eisen leiden, wodurch die biologische Produktion von z. B. Algen (Phytoplankton) begrenzt wird.

Weiterhin bestimmen Aerosolpartikel und Wassertropfchen, die wiederum erst durch die Hilfe der Aerosolpartikel entstehen, die Sichtweite in der Atmosphäre. Sind weniger Partikel in der Luft können wir weiter sehen. Deswegen haben wir auch oftmals nach einem Regenereignis eine gute Fernsicht, da dann die Regentropfen einen Großteil der Aerosolpartikel aus der Atmosphäre ausgewaschen haben.

### **EINFLUSS AUF UNSER KLIMA**

Treibhausgase wie Wasser oder Kohlendioxid haben die Eigenschaft, die von der Sonne einfallende Strahlung zum Erdboden durchzulassen, aber die vom Erdboden abgestrahlte Wärmestrahlung teilweise (wie in einem Treibhaus) zurückzuhalten. Dieser erwärmende „Treibhauseffekt“ führt dazu, dass auf der Erde im Mittel eine Temperatur von 15° Celsius herrscht. Ohne diesen natürlichen Treibhauseffekt würde die mittlere Temperatur bei minus 15° Celsius liegen. Kein Leben wäre auf der Erde möglich. Die Wissenschaftler sind sich heute weitgehend einig, dass der Anstieg der globalen mittleren Temperatur in den letzten Jahrzehnten zumindest zum Teil direkt auf den anthropogen verursachten Anstieg von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen zurückzuführen ist (IPCC 2001).

Aber auch Aerosolpartikel haben eine Auswirkung auf den Strahlungshaushalt der Erde. Ansteigende Aerosolpartikelkonzentrationen führen zu einer höheren Rückstreuung von Sonnenlicht in den Weltraum und damit zu einer Abkühlung am Erdboden. Dies ist der sogenannte direkte Aerosoleffekt. Mit diesem Effekt wurde der Rückgang der Durchschnittstemperaturen seit ca. 1950 erklärt. Vor dem erneuten Ansteigen der Durchschnittstemperaturen in den späten

1970er Jahren gingen Spekulationen gar davon aus, dass die ansteigenden Aerosolkonzentrationen zu einer neuen Eiszeit führen würden. Bei genauerer Analyse zeigte sich allerdings, dass der klimatische Effekt des Aerosols stark von seiner chemischen Zusammensetzung abhängt. Stark licht streuende Komponenten wie Sulfataerosol führen zu einer Abkühlung, stark Licht absorbierende Komponenten wie der schwarze Ruß dagegen zu einer Erwärmung der Atmosphäre (analog, wie sich auch schwarze Kleidung im Vergleich zu weißer Kleidung in der Sonne stärker aufheizt).

Da Aerosolpartikel als Kondensationskerne wirken, beeinflussen sie wesentlich das Ausmaß an Bewölkung und die optischen Eigenschaften von Wolken, was wiederum einen großen klimatischen Effekt nach sich zieht, der evtl. größer als der direkte Effekt der Aerosole ist.

Die genaue Größe des Effektes, den die Aerosolpartikel verursachen, ist aufgrund der komplexen Wechselwirkungen und Rückkopplungsprozesse innerhalb des Klimasystems nicht auf einfache Weise anzugeben. So ist vor allem der Einfluss des indirekten Effektes auf die atmosphärische Strahlungsbilanz bisher nur in Ansätzen verstanden. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand nimmt man an, dass das Aerosol einen abkühlenden Effekt besitzt, also einen Effekt, der die durch die anthropogen bedingte Erhöhung der Treibhausgase verursachte Erwärmung deutlich abschwächt.

### **GESUNDHEITLICHE AUSWIRKUNGEN VON AEROSOLPARTIKELN**

Aufgrund ihrer geringen Größe können die meisten Aerosolpartikel tief in unsere Atemwege eindringen. Hierbei haben die Aerosolpartikel negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Für spezielle Partikelgruppen, wie radioaktive Partikel, Asbestfasern oder Glaswolle sind diese gesundheitsschädlichen Auswirkungen allgemein bekannt. Dies gilt genauso für die Belastung spezieller Berufsgruppen, die täglich mit großen Mengen von Stäuben belastet werden, wie Arbeiter in der Nickelverarbeitung oder im Bergbau.

Weniger bekannt ist aber, dass jede Erhöhung der Partikelkonzentration im normalen täglichen Umfeld einen in epidemiologischen Studien nachweisbaren negativen gesundheitlichen Einfluss auf die Menschen ausübt. So wurde zum Beispiel vielfach ein Zusammenhang zwischen der atmosphärischen Partikelkonzentration und der Anzahl von Sterbefällen zur gleichen Zeit und am selben Ort

nachgewiesen. Das bedeutet, dass die Sterblichkeit von Personen in Städten mit höherer Aerosolbelastung größer ist. Das ist umso beunruhigender, weil dies nicht nur für längerfristige Expositionen gültig ist, die durch den Vergleich von Jahresmittelwerten der Aerosolkonzentrationen erfasst wird. Vielmehr ist der Anstieg der Mortalität schon bei einer wenige Tage andauernden Erhöhung der Partikelkonzentration in der Atmosphäre nachweisbar. Verschiedene Studien haben ergeben, dass bei einer Erhöhung der Partikelkonzentration um  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  die Sterblichkeit der Menschen in den entsprechenden Gebieten um ungefähr 5 bis 17 Prozent ansteigt. Dieser Effekt ist auch beobachtbar in Gebieten mit relativ niedrigen Aerosolkonzentrationen ( $< 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Trotz der klar nachzuweisenden gesundheitlichen Auswirkungen der Aerosolpartikel ist zur Zeit aber noch nicht bekannt, ob Anzahl, Masse, chemische Zusammensetzung, Oberfläche oder eine andere Eigenschaft der Partikel für diese negativen Effekte verantwortlich sind.

Neueste Studien aus den Niederlanden legen den Verdacht nahe, dass vor allem der Staubbeitrag des Straßenverkehrs als Ursache für die erhöhte Mortalität in Frage kommt. In der Studie von Hoek et al. (2002) wurde herausgefunden, dass in einem Versuchszeitraum von acht Jahren in den Niederlanden die Sterblichkeit an Herz/Lungen-Krankheiten für Leute, die nahe an einer Hauptstraße wohnen (näher als 100 Meter an einer Autobahn oder näher als 50 Meter an einer Hauptstraße) fast doppelt so hoch war, wie für andere Leute. Nicht geklärt hierbei ist allerdings, ob dies alleine auf Rußpartikel zurückgeführt werden kann oder ob auch andere negative Auswirkungen des Verkehrs wie Lärm oder gasförmige Emissionen eine Rolle spielen.

#### **AKTUELLE STAUBSITUATION IN DEUTSCHLAND**

Die aktuelle Feinstaubkonzentrationen ( $\text{PM}_{10}$  = Gesamtmasse aller Aerosolpartikel  $< 10 \mu\text{m}$ ) in Deutschland können geographisch aufgelöst auf den Internetseiten des Umweltbundesamtes täglich abgerufen werden (<http://www.env-it.de/luftdaten/start.fwd>). In der Regel liegen die  $\text{PM}_{10}$ -Werte in Deutschland in städtischen Gebieten meist zwischen ca. 20 und  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , in ländlichen Gebieten ungefähr bei der Hälfte. Luftkurorte oder andere besonders abgelegene Gemeinden werben oft damit, dass man dort eine besonders unbelastete Luft

atmen könne. Im Mittel über das ganze Jahr verteilt ist dies auch richtig. Allerdings können Partikel, die an anderer Stelle emittiert werden über hunderte Kilometer transportiert werden. Daher kann es an nahezu jeder Stelle in Mitteleuropa an bestimmten Tagen immer zu einer erhöhten Partikelbelastung kommen, auch wenn in unmittelbarer Umgebung keine starken Partikelquellen vorhanden sind.

Traurige Spitzenreiter, was die Aerosolbelastung in Deutschland angeht sind – trotz deutlicher Verbesserung in den letzten Jahrzehnten, immer noch industrielle Ballungsräume wie Duisburg, Hamburg oder Magdeburg mit Werten um die 100 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft. Dies ist im weltweiten Vergleich allerdings immer noch niedrig, da Städte wie Peking, Dehli oder Kairo oft eine bis zu viermal höhere Partikelkonzentration aufweisen. Bei solchen Partikelkonzentrationen in der Luft sinkt die Sichtweite auf wenige 100 Meter. Die gesundheitliche Belastung der Einwohner ist sehr groß. Manche Schätzungen gehen davon aus, dass mehrere Zehn- bis Hunderttausend Todesfälle in Ländern mit hoher Luftverschmutzung auf die Aerosolbelastung zurückgeführt werden müssen. Laut einer Studie des Umweltbundesamtes sind seit 1990 die anthropogenen Feinstaub-Emissionen in Deutschland um ca. 5 Prozent angestiegen. Im Jahr 2002 emittierte den größten Teil davon die Industrie mit einem Anteil von 39 Prozent. 20 Prozent der Emissionen wurden vom Verkehr verursacht. Dieser Sektor verzeichnete auch die mit Abstand größten Wachstumsraten. Die Landwirtschaft lieferte 15 Prozent, die Kleinverbraucher 23 Prozent und die Energieversorgung 3 Prozent der Gesamtemissionen an Feinstaub.

Ab 2005 sagt die neue europäische Gesetzgebung, dass die Grenzwerte für PM<sub>10</sub> von 50 µg/m<sup>3</sup> „zum Schutze der menschlichen Gesundheit“ nicht länger als 35 Tage pro Kalenderjahr überschritten werden dürfen. Während dies in vielen Regionen bereits jetzt erfüllt wird, ist es fraglich ob in einigen stark industriell belasteten Ballungsräumen dieses Ziel 2005 zu erreichen sein wird.

Aus Sicht der Wissenschaft wäre es ein wesentlicher Fortschritt in Zukunft nicht nur die Partikelmasse im Auge zu behalten, sondern auch die chemische Zusammensetzung, Herkunft und vor allem die Größe der Partikel zu berücksichtigen.

Unbestreitbar hat sich durch den Einsatz moderner Abgasreinigungsverfahren und Filteranlagen in der Industrie die Luftqualität in Deutschland in den letzten Jahrzehnten stark verbessert. Eine weitere



Verbesserung der Luftsituation wäre sicherlich durch die generelle Einführung von Rußfiltern in Dieselfahrzeugen zu erwarten.

Allerdings macht die komplexe Natur des atmosphärischen Aerosols jede Voraussage extrem schwierig. Wie schwierig, zeigt sich am Beispiel der Neuen Bundesländer. Hier konnten Anfang der Neunziger Jahre durch den Einsatz von neuen Filtertechniken die PM10-Werte sehr schnell gesenkt werden. Bei genauerer Betrachtung zeigte sich jedoch, dass vor allem die Entfernung der großen Partikel für die Senkung der PM10-Werte verantwortlich war. Da aber die riesige Oberfläche von großen Partikeln bestens geeignet war, um kleinere Partikel einzufangen, hatte die Entfernung dieser großen Partikel einen deutlichen Anstieg der kleinen Partikel zur Folge, die von vielen als deutlich gesundheitsschädlicher eingestuft werden.

#### LITERATUR

HOEK, Gerard et al.: Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study. The Lancet 360, 2002, S. 1203–1209.

IPCC: Climate Change 2001 – The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Edited by J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson. Cambridge 2001.

SHARP, Mike: Unhealthy Particles. Journal of Environmental Monitoring 2, 2000, S. 71–75.

LOTHAR SCHÜTZ

## VOM WINDE VERWEHT

### MINERALSTAUB IN DER ATMOSPHERE

In der Atmosphäre geht fast nichts ohne Staub! Die gigantischen Stoff- und Energieumsätze, die dort ständig ablaufen, sind ohne das Vorhandensein des Staubs undenkbar. Die Niederschlagsbildung ist von der Existenz der Staub- oder „Aerosolpartikel“ abhängig. Die Staubpartikel sind der Nukleus der Eisbildung („Eiskeime“), und an ihrer Oberfläche („Kondensationskerne“) entstehen Wolken-, Niesel- und Regentropfen. Mit eben dieser Bildung von Niederschlags-elementen ist die Freisetzung latenter Wärme eng verknüpft, Energie, die die Sonne zur Verdunstung von Wasserdampf an der Erdoberfläche aufgewendet hat. Die Existenz von Wolken hat nun ihrerseits wiederum großen Einfluss auf den Energiehaushalt der Erde. Wolken haben einen abschirmenden Effekt und zwar derart, dass sowohl solare Einstrahlung in den Weltraum reflektiert wird als auch thermische Abstrahlung der Erde nicht in den Weltraum gelangen kann. Wolken, und damit Aerosolpartikel, haben somit einen indirekten Einfluss auf die Strahlungsbilanz der Erde.

### STAUB UND DIE FARBE DES HIMMELS

Der direkte Einfluss der in der Atmosphäre suspendierten Partikel erfolgt über die „Extinktion“ (Schwächung) der elektromagnetischen Strahlung im solaren und terrestrischen Wellenlängenbereich, d.h. Wellenlängen vom Ultraviolett über den sichtbaren Spektralbereich bis hin in das ferne Infrarot. Extinktion bedeutet „Streuung“ und „Absorption“ des Lichtes. Streuung setzt sich u.a. wiederum aus der Beugung, Brechung und Reflexion der Lichtstrahlen zusammen und bewirkt die Ablenkung der Sonnenstrahlen von ihrem geraden Weg innerhalb der Atmosphäre. An den Luftmolekülen und Staubteilchen

findet eine vielfache Umlenkung statt, bis die Strahlung den Erdboden erreicht. Eben diese Prozesse sind für die Himmelfarbe verantwortlich. Der Himmel ist blau, wenn wenig Staubpartikel im Strahlengang vor der Sonne sind, im Gegensatz dazu ist der Himmel weiß, wenn viele Staubpartikel in der Luft vorhanden sind. Neben der eben beschriebenen Ablenkung der Strahlen ist die Absorption ein weiterer wichtiger Teilprozess, der zur Extinktion von Strahlung in der Atmosphäre beiträgt. Hier wird die Aufnahme von solarer und terrestrischer Energie an den Partikeln beschrieben, die wiederum an die Atmosphäre in Form von Wärmestrahlung abgegeben wird. An dieser Stelle ist als bekanntes Beispiel der Ruß zu erwähnen, der in Partikelform durch den Menschen, z. B. aus Dieselmotoren oder bei Brandrodung, in die Atmosphäre eingebracht wird. Eben dieser energetische Aspekt verdeutlicht, dass die Strahlungsbilanz in der Atmosphäre und damit unser Klima von dem Partikeleintrag in die Atmosphäre mit bestimmt wird. Der international viel beachtete Report des „Intergovernmental Panel of Climate Change“ aus dem Jahr 2001 schenkt daher den atmosphärischen Aerosolpartikeln eine große Beachtung, da sie in ihrer Wirkung der Erwärmung durch die Treibhausgase entgegenwirken können.

Die Partikel in der Atmosphäre entstammen, auf globaler Skala betrachtet, im wesentlichen aus natürlichen aber auch aus anthropogenen Quellen. Die großen Ballungsräume der Erde mit ihren Emissionen tragen nicht nur zur regionalen, sondern auch durch atmosphärischen Ferntransport innerhalb der allgemeinen Zirkulation zur interkontinentalen Verbreitung atmosphärischer Spurenstoffe bei. In der Natur wird eine erhebliche Menge von Partikeln durch „Zerkleinerungsprozesse“ (z. B. Verwitterung von mineralischem Bodenmaterial, Biomasse, Vulkanstaub) gebildet. Dazu kommt Seesalz aus den Ozeanen, das aus abgetrockneten Tröpfchen herrührt und ebenfalls global transportiert wird. Partikel dieser Herkunft haben Größen mit Durchmesser von etwa 50 nm (Nanometer) bis etwa 50 µm (Mikrometer), wobei diese Grenzen fließend sind.

Ein weiterer Prozess ist dafür verantwortlich, dass sich die heutzutage viel zitierten „Nanopartikel“ bilden, nämlich die „Partikelbildung aus der Gasphase“. Vor allem bei der Verbrennung werden Moleküle von anorganischen und organischen Gasen freigesetzt, die sich rasch zu Aggregaten anlagern und somit kleinste Partikel von wenigen Nanometern im Durchmesser bilden. Diese koagulieren

ebenfalls und wachsen so zu größeren Partikeln von einigen Hundert Nanometern an. So entstehen Partikel mit hohen Massenanteilen von Stickstoff, Schwefel und Kohlenwasserstoffen. Ihre Aufenthaltszeit in der Atmosphäre hängt von den Quellen- aber auch von den Senken-Prozessen ab.

Neben der eben beschriebenen Anlagerung an andere Teilchen werden Partikel z. B. auch durch Sedimentation aus der Atmosphäre ausgeschieden. So haben naturgemäß sehr kleine Partikel wie auch sehr große nur eine kurze Aufenthaltszeit. Mittlere Größen in der Dimension von etwa  $1/10\ \mu\text{m}$  bis zu einigen Mikrometern können in Bodennähe etwa eine Woche verweilen, bis sie in die Niederschlagsbildung mit einbezogen und ausgegnet werden. Alle Partikel, die nicht ausgegnet werden, verbleiben nach Abtrocknen der Tropfen in der Atmosphäre und werden erneut in den Kreislauf einbezogen. Sie sind also in der Atmosphäre eine wichtige „Oberfläche“, auf der Wasserdampf kondensieren kann. Ohne den Staub in der Atmosphäre müsste der Wasserdampf an der Erdoberfläche kondensieren und an allen Lebewesen, die auf der Erde herumlaufen. Die Menschen liefen wohl alle mit einem Tropfenfänger unter der Nase herum!

### **DIE WÜSTE STAUBT**

Eine sehr große Quelle für atmosphärische Partikel sind die Wüsten der Erde. Man kann abschätzen, dass jährlich etwa 1,5 Milliarden Tonnen Wüstenstaub in die Atmosphäre eingebracht werden. Diese Menge ist ein vergleichsweise hoher Anteil der insgesamt etwa fünf Milliarden Tonnen Aerosolpartikel aus allen natürlichen und anthropogenen Quellen, die pro Jahr global in die Atmosphäre entlassen werden. Der Mineralstaub entstammt den großen ariden und semi-ariden Gebieten der Kontinente im Bereich der Subtropen. Dabei ist der Komplex der Sahara die wohl größte Quelle, gefolgt von den Wüsten der Arabischen Halbinsel, des Mittleren Ostens, der südlichen GUS-Staaten und den Wüsten Chinas (Takla Makan und Gobi). Hinzu kommen die Wüsten Nordamerikas, auf der Südhalbkugel große Gebiete Australiens sowie die Wüste Namib in Südafrika. Die Beiträge dieser Quellen lassen sich im einzelnen nicht leicht abschätzen, denn die Emission haben saisonalen Charakter. Die jährliche Produktion unterliegt starken Variationen und ist auch durch Fernerkundungsverfahren nicht immer eindeutig erfassbar.

Hier besteht immer noch Forschungsbedarf. Zurzeit wissen wir wenig über die Quellaktivität der Wüsten der Südhalbkugel. Tiefseesedimente um Australien und vor der Namib zeigen unter der Abluftfahne der Wüsten Ablagerungen von luftgetragenen Partikeln am Boden des Pazifischen, Indischen und Atlantischen Ozeans. Diese Tatsache verweist zumindest auf eine temporäre Aktivität der Quellen in der Vergangenheit und heute. Unstrittig ist die große Bedeutung der Sahara, die sowohl flächenmäßig, mengenmäßig und durch permanente Produktion und „Export“ an der Spitze der aktiven Quellen steht. So stammen etwa 0,9 Milliarden Tonnen Mineralstaub aus der Sahara, und die restlichen 0,6 Milliarden Tonnen verteilen sich auf die übrigen Wüsten. Dabei wird der Anteil, der auf anthropogene Aktivitäten (Verkehr, Landwirtschaft, ...) zurückgeführt wird, auf etwa zehn Prozent abgeschätzt.

Morphologisch sind diese Wüsten Fels-, Geröll-, Kies- und Sandwüsten, die fast alle einen Beitrag durch Verwitterung zur Produktion von Staub leisten. Ein Teil davon geht in den luftgetragenen Zustand und wird über große und selbst interkontinentale Entfernungen bis 10.000 Kilometer transportiert. Die für den Ferntransport produktivsten Flächen sind jedoch in der Regel vergleichsweise klein in Bezug auf die gesamte Wüstenfläche. Es sind z. B. die Gebirgsränder des Hoggar (Algerien), des Air (Niger) und des Tibesti (Tschad). Dazu gehören besonders auch die Wadis und Depressionen, in denen sich „feinkörniges“ Material angesammelt hat. Satellitenbilder bestätigen diese Annahme und zeigen zahlreiche häufig aktive und lokal begrenzte „hot spots“, verteilt über die ganze Sahara. Bekannte Beispiele sind u.a. die Bodele Depression im Tschad oder der Chott el Djerid an der Grenze von Tunesien und Algerien.

Darüber hinaus entstehen täglich unzählige Kleintromben (Windhosen) über der Wüste, die für einen konstanten Strom luftgetragenen Bodenmaterials in die Luft sorgen. Es bedarf also nicht immer des Auftretens der Sand- und Staubstürme, um für eine für das Auge sichtbare Staubtrübung der Atmosphäre zu sorgen, die den Himmel eher weiß als sonst im üblichen Blau der Reise Prospekte erscheinen lässt. Die großflächigen Erges oder Sandseen sind keine Quellen für luftgetragenen Staub, da sie fast ausschließlich aus der „Sandfraktion“ (Partikeldurchmesser: 63  $\mu\text{m}$ –2 mm) bestehen. Sie enthalten nur wenig „Schluff“ (Partikeldurchmesser: 2  $\mu\text{m}$ –63  $\mu\text{m}$ ) und praktisch keine „Tonminerale“ (Partikeldurchmesser:

kleiner 2 µm), die leicht erodiert und in der Luft transportiert werden können. Es ist daher nicht verwunderlich, wenn die Wüstenstäube, die in den Ferntransport gehen, sehr hohe Anteile von Tonmineralen wie Kaolinit, Montmorillonit, Illit, und Chlorit enthalten, sowie Quarz, Felspäte und auch andere Minerale, die der Schlufffraktion zuzuordnen sind. Die Zusammensetzung der Mineralstäube ist abhängig von dem Untersuchungsgebiet, wenngleich keine einfache quelltypische Zusammensetzung genannt werden kann. Die Wissenschaft ist daher immer noch auf der Suche nach „fingerprints“, die zur Quellidentifizierung beitragen können.

### WINDE DER WÜSTE

Untersuchungen in der Sahara und in ihrem Umfeld und in den chinesischen Wüsten haben gezeigt, dass Partikel, die kleiner als etwa zehn Kilometer im Durchmesser sind, über große Entfernungen von Tausenden von Kilometern in der Atmosphäre transportiert werden können, bis sie ausfallen oder aber, meistens durch den Niederschlag, aus der Atmosphäre entfernt werden. Dieser Prozess kommt auch dadurch zustande, dass die Partikel über den Wüsten, wie z. B. über der Sahara, durch die starke Konvektion auf Höhen von etwa fünf Kilometer getragen werden und somit Starkwindzonen erreichen, die wiederum den Ferntransport begünstigen. Ein nahezu permanenter Strom von Saharastaub, auch überlagert von spektakulären und singulären großen Staubausschüben nach schweren Sandstürmen, wird über den südlichen Nordatlantik in die Karibische See, nach Mittelamerika und in die Amazonas-Region getragen, wo lösliche Komponenten des Staubes zur Düngung des Regenwaldes beitragen. Nach solch großen Transportentfernungen von Tausenden von Kilometern kann man immer noch davon ausgehen, dass noch etwa ein Fünftel der ursprünglich an der Quelle emittierten Masse luftgetragen ist. Die Sahara exportiert ebenfalls große Mengen in Richtung des tropischen Regenwaldes über Afrika nach Süden bis in den Golf von Guinea und in die Innertropische Konvergenzzone. Die Vermutung liegt nahe, dass er eine Rolle bei der Bildung der großen tropischen Gewittertürme in Äquatornähe spielt, die Gipfelhöhen von bis zu 18 Kilometer erreichen können. Der Nordtransport aus der Sahara heraus kann etwa bis zu 100 Millionen Tonnen pro Jahr betragen und erreicht vor allem das östliche Mittelmeer. Europa verzeichnet regelmäßige Staubeinbrüche, die auch noch in Skandinavien beobachtet werden

können. Sie werden besonders in der Zeit vom Spätwinter bis zum Sommer registriert.

Neben den Tiefseesedimenten sind es die Eisbohrkerne, wie in den Alpen, die den regelmäßigen Eintrag des luftgetragenen Materials dokumentieren. Rote und gelbliche Staubablagerungen auf den Schneeflächen in den Alpen sind eine regelmäßige Erscheinung. Auch an anderen Orten Mitteleuropas wird die nasse Deposition von Saharastaub mehrfach pro Jahr beobachtet. Sie tritt besonders bei Regen in Verbindung mit subtropischen Luftmassen auf, die ihren Ursprung über dem afrikanischen Kontinent haben, wo ein nahezu permanentes Reservoir staubhaltiger Luft vorhanden ist. Die neutralisierende Wirkung der Karbonate aus dem Staub der Nordsahara zeigt sich dann in einer deutlichen Absenkung des Säuregehaltes des Regens.

Die Wechselwirkung des natürlichen Staubes mit anderen Spurenstoffen anthropogenen Ursprungs zeigen auch Beispiele des „Asien-Staubes“. Der Wüstenstaub aus der Takla-Makan und der Gobi-Wüste stellt eine Adsorptions- bzw. Reaktionsoberfläche für die Industrieabgase aus China und Emissionen über Korea und Japan dar. So werden z. B. bodennahes Ozon und Stickoxide an Staub zerstört und somit aus der Atmosphäre entfernt. Der Staubtransport aus den Wüsten Asiens erstreckt sich über den Pazifik hinweg bis in das arktische Becken und erreicht schließlich das Hochplateau von Grönland. Untersuchungen der Eisbohrkerne belegen die Herkunft des Mineralstaubs aus den Wüsten Asiens.

## MODELLE UND MESSUNGEN

Die Omnipräsenz des Mineralstaubs in der Atmosphäre unterstreicht seine globale Bedeutung, auch vor dem Hintergrund möglicher Verschiebungen von Klimazonen in der Zukunft und der etwaigen Zunahme des Flächenanteils der Wüsten. Die eingangs angesprochenen wichtigen Prozesse der Strahlungsübertragung und Niederschlagsbildung in der Atmosphäre sind in Grundzügen bekannt und können in „Modellen“ durch numerische Simulationen auf Großrechenanlagen näherungsweise durchgespielt werden. Eine Überprüfung der Ergebnisse solcher Simulationen setzt natürlich die Verifikation mit Hilfe aktueller Messungen „vor Ort“ voraus. Die künftige Forschung wird daher zur Lösung der klimarelevanten Fragestellungen eine konzertierte Aktion in Form einer gemeinsamen Messkampagne zur

Erzielung eines umfangreichen Datensatzes vom Boden bis in große Höhen der Atmosphäre über einer Wüste anstreben müssen. Mit diesen gewonnenen Daten sind numerische Modell-Simulationen zu überprüfen. Solche Modellsimulationen werden erlauben, die Prozesse auch für andere Wüstenregionen zu berechnen und schließlich die Entwicklung des künftigen globalen Klimasystems besser abzuschätzen zu können. Dieses Ziel hat sich eine deutsche Forschergruppe (SAMUM) gesetzt, die in den nächsten Jahren mit Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) ein großes Feldexperiment im Süden Marokkos durchführen wird, das von umfangreichen numerischen Modellsimulationen zur Klimawirksamkeit des Mineralstaubes und zur Verbesserung von Fernerkundungsmethoden begleitet sein wird.

### **VULKANE UND KLIMA**

Während Staub von Vulkanausbrüchen bei Betrachtungen zur jährlichen Bilanz aller Stäube, die in die Atmosphäre getragen werden, nur von untergeordneter Bedeutung sind, so können singuläre Vulkanausbrüche mit ihren gewaltigen Stauberuptionen dennoch einen Klimaeffekt haben.

Wir erinnern uns noch alle an den Ausbruch des Vulkans Pinatubo auf den Philippinen im Jahr 1992. Spektakuläre Bilder gingen durch die Presse und zeigten unter anderem, wie sich unter dem riesigen Schirm des Vulkanstaubs der Himmel verdunkelte. Dies war der lokale und temporäre Effekt von massiver Schwächung von Sonnenstrahlung an Staub, gefolgt von einer Temperaturerniedrigung in der Region des Ausbruchs. Darüber hinaus hatte dieses Ereignis noch eine großräumige klimatische Dimension auf der Nordhalbkugel. Bedingt durch die Eruption, die weit in die Stratosphäre eintrat, konnte der Staub rasch interhemisphärisch verfrachtet werden. Da in der Stratosphäre die Aufenthaltszeiten für Staubpartikel in der Größenordnung von einem Jahr liegen, verwundert es nicht, dass in der Folgezeit die Mitteltemperatur der Nordhalbkugel um etwa 0.5 °C abgenommen hat. In der Vergangenheit wurden schon öfters solche klimarelevanten Beobachtungen (AGU 1992) gemacht. So z.B. nach dem Ausbruch des Tambora in Indonesien im Jahre 1815, der die 10fache Masse von Magma wie der Pinatubo emittierte, wurden in weiten Teilen Europas Missernten mit katastrophalen Folgen für die Bevölkerung verzeichnet, da der Sommer ausgefallen war. Solche Vul-



kanausbrüche, die in die Stratosphäre Staub emittieren, haben immer einen Klimaeffekt. Es ist anzunehmen, dass in der Erdgeschichte auch Global-Katastrophen, die z. B. auf Einschläge großer Meteoriten zurückzuführen sind, letztlich in ihrer Wirkung durch die Extinktion von Sonnenlicht in riesigen Staubwolken in der Stratosphäre zu erklären sind. Vulkanausbrüche, die lediglich in die Troposphäre (Höhen in mittleren Breiten bis zwölf Kilometer) emittieren, haben solche inter-hemisphärischen Wirkungen nicht, sie beeinflussen kurzzeitig nur die Regionen in ihrer Abluftfahne. Der Staub wird in der Troposphäre in die Niederschlagsbildung einbezogen und wird spätestens nach wenigen Wochen mit dem Regen aus der Atmosphäre ausgeschieden. Auf Grund der engen Koppelung an den Niederschlagszyklus haben Stäube aller Quellen in Bodennähe eine mittlere Verweildauer von ein bis zwei Wochen in unserem Lebensraum.

#### LITERATUR

AGU: Volcanism & Climate Change. American Geophysical Union. Special Report, May 1992.

IPCC: Climate Change 2001 – The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Edited by J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson. Cambridge 2001.

SAMUM: Saharan Mineral Dust Experiment. Forschergruppe der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) (<http://samum.tropos.de:8090/index.html>).

ARNE FRIEDMANN, MARTINUS FESQ-MARTIN UND MICHAEL PETERS

## ARCHIVE DER NATUR

### BLÜTENSTAUB ALS SCHLÜSSEL ZUR ERFORSCHUNG VERGANGENER LANDSCHAFTEN

Mit schriftlichen Quellen, etwa antiken Landesbeschreibungen (Caesar: *De bello Gallico*; Tacitus: *Germania*) oder Zeugnissen aus alten Klosterbibliotheken, lassen sich Informationen über vergangene Umwelten gewinnen. Mit dem Studium von Literatur kann man in Mitteleuropa jedoch nicht in Zeiten vordringen, die vor der römischen Okkupation liegen. Meist reichen die schriftlichen Quellen sogar nur bis ins frühe Mittelalter zurück.

Das Tor in die älteste Vergangenheit eröffnen jedoch naturwissenschaftliche Methoden, die in der Lage sind, Umweltarchive auszuwerten. Diese natürlichen Archive entstehen, wenn organisches Material nicht zersetzt, sondern durch Trocknung oder unter Sauerstoffabschluss konserviert wird. Voraussetzung ist allerdings, dass diese biologischen Reste zeitlich geschichtet abgelagert werden. In Mitteleuropa existieren solche chronologisch stratifizierte Ablagerung in Mooren als Torf und auf dem Grund von Seen als Seesedimente. Das biologische Material - etwa Blütenstaub oder die Chitinpanzer von Insekten - bleiben in diesen natürlichen Archiven unter Sauerstoffabschluss über Jahrtausende konserviert.

### INFORMATIONEN AUS FOSSILEM STAUB

Als „Bibliotheken der Natur“ (Peters, Friedmann und Fesq-Martin 2003) soll die Bedeutung von Mooren dargestellt werden: Oberflächlich eingetragener Staub, darunter besonders Blütenstaub (Pollenkörner) aber auch Holz, Knospen, Blätter, Früchte und Samen (Großreste) werden in den beständig aufwachsenden Moosschichten eingeschlossen. Es bleibt also Jahr für Jahr eine Chronik des Blütenstaubes im Torf erhalten.

Diese natürlich erhaltenen Umweltinformationen lassen sich mit Hilfe der Pollen- und Sporenanalyse sowie der Großrestanalyse analysieren. Da die Pollenkörner sich nach ihrem Aussehen unterscheiden, kann man durch ihre Bestimmung die verschiedenen Familien, Gattungen und teilweise sogar die Arten der Pflanzen rekonstruieren, die den Pollenniederschlag produziert haben. Man erhält so einen Einblick in die Vegetationsverhältnisse der letzten Jahrtausende aber auch in vorgeschichtliche Zeitabschnitte.

Die in Torfschichten eines Moores erhaltenen Pflanzenreste liefern darüber hinaus wertvolle Informationen (Friedmann 2003), die sich zur Interpretation von Klimaveränderungen und der regionalen Landnutzung einsetzen lassen. Sie sind also wichtige, oft sogar die einzigen Quellen zur Langzeitrekonstruktion von Vegetations- und Landschaftsgeschichte.

Die Pollen- und Sporenanalyse, ein Teilgebiet der Palynologie<sup>1</sup> (Abb. 1), befasst sich mit der qualitativen und quantitativen Bestimmung von Pollenkörnern der Blütenpflanzen (Spermatophyten) sowie den Sporen der Farn- (Pteridophyten) und Moospflanzen (Bryophyten) aus quartären (bis 2,4 Millionen Jahre) und älteren Ablagerungen (Friedmann 2000).

Was ist Pollen? Nichts anderes als Blütenstaub. Das Substantiv „der Pollen“ oder „die Pollenkörner“ bezeichnen den Plural, die Einzahl beschreibt der Begriff „das Pollenkorn“ (die Pluralform „die Pollen“ wird zwar oft verwendet, ist aber falsch).

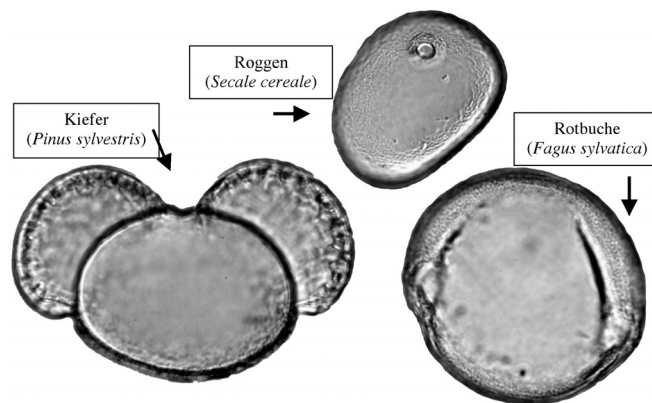


Abb. 1: Mikroskopische Aufnahmen einiger Pollenkörner.

## PRODUKTION UND VERBREITUNG VON BLÜTENSTAUB

Verschiedene Arten produzieren unterschiedliche Mengen an Pollen (Tab. 1) und verbreiten diesen auch unterschiedlich:

Tab. 1: Pollenproduktion einiger Gehölzarten. Daten aus Lang (1994).

Gehölzart	Pollenproduktion in einem männl. Blütenstand in Mio.
Pinus sylvestris (Kiefer)	5,8
Alnus glutinosa (Erle)	4,5
Corylus avellana (Hasel)	3,9
Quercus robur (Eiche)	1,125
Fagus sylvatica (Buche)	0,175

Man unterscheidet:

- *Anemophile (anemogame)* Pflanzen:  
Produktion meist größerer Pollenmengen, Transport durch den Wind (etwa Kiefer, viele Gehölze, Farne).
- *Entomophile (entomogame)* Pflanzen:  
Produktion geringerer Pollenmengen, Transport durch Insekten (etwa Buche, Roggen, Spitzwegerich).
- *Amphiphilen* Pflanzen:  
Produktion größerer Mengen, Transport überwiegend durch Insekten, zum Teil auch durch den Wind (etwa Weide, Linde, Wiesenknöterich).

Pollenkörner (Größe:  $10\text{--}100\text{ }\mu\text{m} = 0,1\text{--}0,01\text{ mm}$ , Abb. 1) entstehen bei den Blütenpflanzen zum Zweck ihrer sexuellen Fortpflanzung in den Pollensäcken der Staubblätter. In den Pollenkörnern ist die männliche genetische Information (DNS der generativen Kerne) der Pflanzen gespeichert. Zur Befruchtung wird der Pollen durch ein Transportmittel – durch den Wind oder durch Insekten – zu den weiblichen Blütenteilen (Narbe) transportiert.

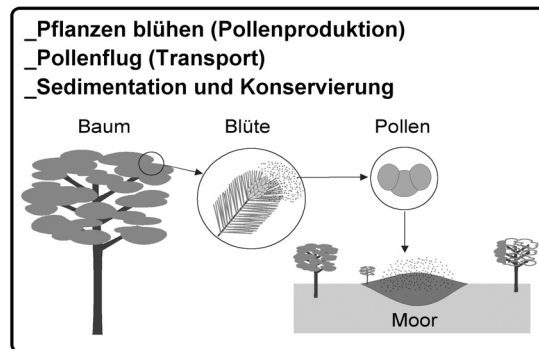


Abb. 2: Von der Blüte zum sedimentierten Pollen. Nach Peters aus Peters et al. 2003.

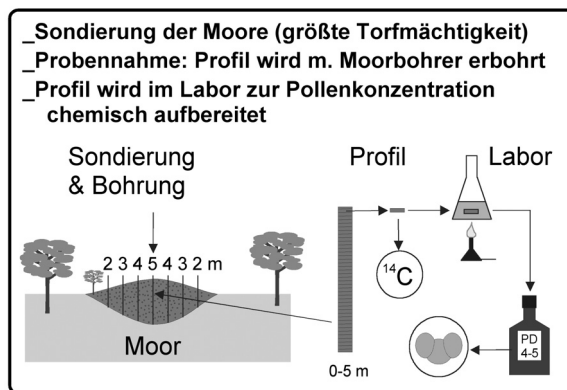


Abb. 3: Die Pollen- und Sporenanalyse: vom im Moor konservierten Pollen zum Pollendiagramm.

Der gute Erhaltungszustand von subfossilem und fossilem Pollen erklärt sich aus dem Aufbau des Pollenkorns. Es besteht aus drei Teilen: Neben dem eigentlichen zellulären Polleninhalte (Mikroprothallium aus generativer Spermatumutterzelle und vegetativer Zelle) und der inneren Pollenkornwand (Intine), die bei der Ablagerung in Moo-

ren oder Seen jedoch rasch zersetzt werden, besitzt das Pollenkorn noch eine sehr widerstandsfähige Exine. Diese äußere Wandschicht besteht aus dem polymeren Terpen Sporopollenin, dem starke Laugen und Säuren, sogar Flusssäure, kaum etwas anhaben können (Lang 1994). Sporopollenin gehört zu den widerstandsfähigsten Substanzen im Organismenreich. Allerdings kann Sauerstoff die Pollenhülle angreifen. So erhalten sich Pollenkörner in natürlichen Archiven über geologische Zeiträume – unter der Voraussetzung, dass der Blütenstaub in sauerstofflosem Milieu eingeschlossen wurde, etwa in Mooren oder im Sediment von Seen.

Die gesamte Pollenanalyse basiert somit auf der guten Erhaltungsfähigkeit der äußeren Pollenwand (Exine), wobei die Familien, Gattungen und teilweise auch die einzelnen Pflanzenarten charakteristische Formen derselben ausbilden. Diese besondere Morphologie der Exine ist das Schlüsselmerkmal zur mikroskopischen Auswertung von Pollenproben. Der Pollen wird hierbei nach der Anordnung und Häufigkeit seiner Öffnungen (Pori und/oder Colpi zum Auskeimen des Pollenschlauchs) sowie spezifischer Oberflächenstrukturen identifiziert (Beug 2004). Die Pollenkörner etwa aus einer Torfprobe werden nicht nur qualitativ (pflanzensystematisch) bestimmt, sondern auch gezählt, um quantitative Aussagen über die Häufigkeiten der unterschiedlichen Pollentypen machen zu können. Die graphische Darstellung der quantitativen Ergebnisse erfolgt in Form von Pollendiagrammen. Die Profilabfolge mit Tiefenwerten, die Prozentwerte der verschiedenen Pollentypen sowie <sup>14</sup>C-Datierungen werden synchron nebeneinander aufgezeigt.

### CHRONIK DES BLÜTENSTAUBS

Moore als „Bibliotheken der Natur“ konservieren wichtige Umweltinformationen aus vergangenen Zeiträumen. Nur durch die Ergebnisse der Pollenanalyse war es möglich, etwa die nacheiszeitliche Entwicklung der Vegetation in Bayern zu rekonstruieren.

Die Methode der Pollenanalyse ist ebenfalls für die Archäologie von großer Bedeutung. Durch die Analyse vergangener Landschaften und Landschaftsveränderungen sowie durch das Auffinden von Kulturzeigern (etwa Getreidepollenkörner als früheste Nachweise für Ackerbau) lassen sich Rückschlüsse auf die ökologischen und ökonomischen Rahmenbedingungen prähistorischer und historischer Kulturen ziehen.

Anhand der Landschaft um den Starnberger See soll in folgendem exemplarisch die Dynamik und der Wandel von Umwelt dargestellt werden. Diese regionale Vegetationsgeschichte ist aus der vergleichenden Betrachtung mehrerer Pollenanalysen entstanden (Küster 1995, Kossack & Schmeidl 1975). Die vorgestellten Abläufe beziehen sich auf das eigens für die Ausstellung „Staub – Spiegel der Umwelt“ konservierte Torfprofil.

*Späteiszeit (Spätglazial; bis 11.580 Jahre vor heute)*

In der letzten Eiszeit (Würm-Kaltzeit) erstreckte sich die Würmsee-Gletscherzunge des Isarvorland-Gletschers bis zur Karlsburg im Norden des heutigen Starnberger Sees. Das Seebecken war noch vor 18.000 Jahren mit Eis gefüllt. Moränen und weitere glaziale Formen schufen das abwechslungsreiche Relief der Landschaft. In den späteiszeitlichen Erwärmungsphasen, welche dem Höhepunkt der Vereisung folgten, verschwand die Eisbedeckung, und die Wiederbesiedlung mit einer zwergstrauchreichen Grassteppenvegetation konnte einsetzen.

Bald schon (Bölling-Interstadial; ca. 14.000-13.000 Jahre vor heute.) prägten höherwüchsige Gehölze wie Birken und Kiefern das Vegetationsbild. Häufig kam es jetzt zu Waldbränden; allerdings besitzen Kiefer und Birke als anspruchslose Pionierbaumarten ein hohes Regenerationspotenzial, so dass die verbrannten Flächen rasch wieder verbuschten. Die Wälder der späten Eiszeit waren noch sehr licht und von subarktischen Kräutern, wie Beifuß, Wiesenraute, Sonnenröschen, Fingerkraut und Steinbrech, durchsetzt. Im relativ warmen Alleröd-Interstadial (ca. 13.000-12.000 vor heute) verdichteten sich die Kiefernbestände und der Anteil von Offenland nahm deutlich ab.

Im Gegensatz zur Alleröd-zeitlichen Erwärmungsphase blieb die Klimaschwankung der Jüngeren Dryas-Zeit (ca. 12.000-11.100 Jahre vor heute) für den Aufbau und die Struktur der Wälder weitgehend ohne Folgen: Kiefer und Birke sind sehr frostharte Baumarten, die eine Abkühlung von wenigen Grad Celsius tolerieren. Nur im Bereich der alpinen Waldgrenze (damals bei ca. 1.500 m ü. NN, vgl. Burga & Perret 1998) dürfte sich dieser letzte bedeutende Klimarückschlag negativ auf den Baumwuchs ausgewirkt haben.

*Vorwärmezeit (Präboreal; 11.580–9.800 Jahre vor heute)*

Mit dem Beginn der Nacheiszeit vor ca. 11.100 Jahren stieg die Jahresmitteltemperatur innerhalb kurzer Zeit um drei bis fünf Grad Cel-

sus an. Nach Burga und Perret (1998) verlängerte sich dadurch die Vegetationsperiode um vier bis fünf Wochen. Noch blieb aber das Vegetationsbild am Starnberger See für viele hundert Jahre unverändert. Es dominierte, wie schon in den Jahrtausenden zuvor, die Kiefer, und in den vergleichsweise lichten Wäldern hatten auch die typischen Vertreter der Tundrenflora noch ihren Platz. An dieser Stelle ist zu betonen, dass die ersten Kiefernwälder Süddeutschlands ganz anders aufgebaut waren als die heutigen. Damals besetzte die Kiefer auch beste Standorte, heute ist sie dagegen auf Extrembereiche (Moore, Hochlagen der Gebirge) beschränkt, wo sie zwar durch konkurrenzkräftigere Bäume nicht verdrängt werden kann, aber weit entfernt von ihrem physiologischen Optimum „kümmt“. Am treffendsten wäre es, Schneeheide-Kiefernwald-Komplexe, wie etwa auf den Isarschottern bei Wolfratshausen, als Relikt spätglazialer Kiefernwälder zu bezeichnen.

Im weiteren Verlauf der Vorwärmezeit (Präboreal) wurden die Steppenarten immer seltener und in den Wäldern rings um den Starnberger See mischten sich erste Ulmen, Linden und Eichen zwischen die Kiefern. Langsam wanderte auch die Erle ein; Schotterflächen etwa am Rand des Würmtales, wurden dabei hauptsächlich von der Grünerle besiedelt. Die Flusssysteme hatten sich noch nicht stabilisiert und häufig kam es zur periodischen Zerstörung von Erlenstandorten.

In der Krautschicht war die Artenvielfalt zunächst noch gering. Es überwogen Süßgräser und Korbblütler, also eher lichtliebende Arten, und zwar hauptsächlich auf Schotterbänken oder in Waldlichtungen. Wiesen im heutigen Sinn gab es dort aber noch nicht. Die etwa durch Windwurf oder Brände entstandenen Lichtungen wurden rasch wieder von Heidekraut, Birke und Kiefer zurückerobert.

#### *Frühe Wärmezeit (Boreal; 9.800–8.200 Jahre vor heute)*

Das Boreal repräsentiert nur eine relativ kurze Phase in der nacheiszeitlichen Waldgeschichte. Schrittweise entstand das typische Bild der nacheiszeitlichen Vegetation Mitteleuropas. Der weitflächige Kiefernwald verschwand in diesem Prozess des Wandels als vorherrschendes Ökosystem.

Mit einem Komplex aus verschiedenartig aufgebauten Eichenmischwäldern stellten sich nun erstmals stabile Laubwaldgesellschaften ein. Dabei entwickelten sich am Starnberger See eichenreiche, zum Alpenrand hin aber ulmenreiche Bestände, was zur Ausprägung einer



Vegetationsgrenze (Eiche im Norden, Ulme im Süden) führte, welche zwischen dem Chiemsee im Osten und dem Schongau im Westen verlief (vgl. Küster 1995).

Im Unterwuchs der lichten frühwärmezeitlichen Eichen- und Ulmenwälder kam jetzt immer mehr die Hasel auf. Küster (1995) betrachtet die Entwicklung zu einem stärker ozeanisch geprägten, feuchten Klima, verursacht durch das frühnacheiszeitliche Vorrücken der Nordsee bis auf die heutige Küstenlinie, als Initial für die Ausbreitung dieser Strauchart von West nach Ost.

Schritt für Schritt wanderte jetzt auch die Fichte ein und setzte ab der Mitte des Boreals zur Massenausbreitung an.

*Mittlere Wärmezeit (Atlantikum; 8.200–5.100 Jahre vor heute)*

Im zunehmend feuchteren und wärmeren Klima der Mittleren Wärmezeit verbesserten sich die Wuchsbedingungen für die Hasel und den Eichenmischwald weiter. Eichen-, ulmen- und lindenreiche Edellaubwälder bedeckten jetzt weite Teile der Jungmoränenlandschaft. Auch die Fichte erreichte in der Mittleren Wärmezeit den Höhepunkt ihrer Verbreitung und verdrängte dabei die Kiefer endgültig auf Extremstandorte.

Nur wenig später traten zwei weitere Baumarten auf: Tanne und Buche durchsetzten mehr und mehr die Eichenmischwälder; wobei sich die Tanne etwas früher und anfangs auch stärker ausbreitete als die Buche. Am Alpenrand hat sie dabei Standorte der Ulme besetzt und diese in feuchtere Lagen verdrängt. Aber schon mit dem Ausklang der Mittleren Wärmezeit und dem Übergang in die Späte Wärmezeit musste die Tanne ihrerseits an vielen Stellen der Buche weichen. Vermutlich war der Mensch an der schnellen Buchenausbreitung beteiligt, steigt doch die Buchenpollenkurve in zahlreichen Pollendiagrammen Süddeutschlands synchron mit dem Auftreten früher Siedlungszeiger an. Siedlungszeiger sind etwa Pollen von Getreidearten, aber auch Pollen etwa des Spitzwegerichs, der an von Menschen begangenen Wegen gedeiht.

Nach neuesten Forschungsergebnissen siedelten seit der mittleren Jungsteinzeit (ca. 6.000 Jahre vor heute) an den Ufern des Starnberger See erste bäuerliche Kulturen (Fesq-Martin, Lang, Peters 2002). Eine herausragende Rolle spielte dabei neben dem Anbau der Weizenarten Einkorn und Emmer wohl auch der Leinbau. Mit dem wirtschaftlich-sozialen Umbruch zu einer sesshaften bäuerlichen

#### DIE TECHNIK DER POLLENANALYSE

Die Probennahme für eine Pollenanalyse erfolgt etwa in einem Hochmoor durch Bohrung mit einem Moorbohrer (Russischer Kammerbohrer) oder einem Motorkernbohrgerät. Ziel ist die Gewinnung eines ungestörten Torfprofils als lange kontinuierliche Zeitreihe. Die entnommenen Kerne werden ins Labor gebracht und eingefroren. Danach werden sie in gefrorenem Zustand aufgeschnitten (Probenabstand zwischen 1, 2, 5 oder 10 cm) und je nach Pollendichte eine 1-5 cm<sup>3</sup> große Probe entnommen. Diese Torfprobe umfasst einen mehrere Jahrzehnte langen Abschnitt der Blütenstaubsedimentation und bestimmt wie hochauflösend eine Analyse ist.

Zur Erkennung der Pollenkörner unter dem Mikroskop müssen diese konzentriert und von Begleitmaterial (Kalk, Huminsäuren, mineralisches Substrat) getrennt werden. Für diese Anreicherung hat sich folgende Vorgehensweise bewährt (Faegri und Iversen 1989):

- Auflösen des in der Probe vorhandenen Kalks (Calciumcarbonat) durch 10 prozentige Salzsäure (HCl)
- Aussonderung der Großreste zur späteren Makrorestanalyse durch Sieben
- Eliminierung von Huminsäuren durch Zugabe von Kalilauge (KOH) und/oder Natronlauge (NaOH)
- Entfernung von Zellulose durch Azetolyse (Essigsäure-Anhydrit + konzentrierte Schwefelsäure)
- Abtrennung der Silikate durch 40 prozentige Flußsäure (HF)
- Aussonderung weiteren Sedimentmaterials durch Sieben (Mikronetze) oder Trennung durch Ultraschall im Wasserbad

Die angereicherten Pollen werden dann mit Glycerin versetzt und im Ultraschüttler homogenisiert. Diese Pollen-Glycerin-Mischung wird in verkorkten Gläsern aufbewahrt oder direkt auf Objektträger zur anschließenden Pollenzählung aufgebracht werden.

Das Pollenpräparat wird nachfolgend mit einem Durchlichtmikroskop mit Phasenkontrastoptik und Kreutztisch unter einer vierhundert- bis tausendfachen Vergrößerung ausgezählt. Pro Probe werden mindestens 500 Baumpollen beziehungsweise 1.000 terrestrische Pollenkörner ausgezählt, was eine Gesamtzahl von bis zu 100.000 gezählten Pollenkörnern pro einem Meter Bohrstrecke ergibt. Bei der Prozentpollenanalyse werden die einzelnen Pollenarten in Prozent (%) der Gesamtsumme der Gehölzpollen oder der Gesamtsumme der auftretenden terrestrischen Pflanzentypen berechnet.

Für eine Pollenanalyse in unserem Raum unterscheidet man etwa 10–20 Typen von Baumpollen (BP, AP) und 20–30 Nichtbaumpollen (NBP, NAP), die vor allem von Gräsern (Poaceae), Heidekrautgewächsen (Ericaceae), Getreide (Cerealia) und Kräutern stammen. Der am häufigsten in unserer Region auftreten den Baumpollen stammt von: Fichte (*Picea abies*), Tanne (*Abies alba*), Kiefer (*Pinus sylvestris*), Birke (*Betula* spp.), Hasel (*Corylus*), Linde (*Tilia* spp.), Erle (*Alnus* spp.), Hainbuche (*Carpinus*), Ulme (*Ulmus* spp.), Buche (*Fagus sylvatica*), Eiche (*Quercus* spp.) und Esche (*Fraxinus* spp.).

Die Rekonstruktion vergangenen Lebens kostet Zeit: Für die Auswertung eines drei bis vier Meter langen Moorbohrkerns braucht man mindestens ein Jahr.

Lebensweise mit Ackerbau und Viehzucht begann jetzt die Umgestaltung der Natur- zur Kulturlandschaft.

*Späte Wärmezeit (Suboreal; 5.100-2.800 Jahre vor heute)*

Die Späte Wärmezeit war die Zeit der Buche: Von jetzt an dominierte sie endgültig die Wälder rings um den Starnberger See und verdrängte dabei vor allem die Eichen aus ihrem ökologischen Optimum. Auch das südliche Alpenvorland bis zu den Alpen wurde jetzt Buchengebiet. Die Ulmen mussten sich hier in feuchtere Hanglagen und die Linden auf sonnig-trockene Stellen zurückziehen.

Schließlich begann etwa tausend Jahre vor Christi Geburt als letzte „neue“ Baumart die Hainbuche Fuß zu fassen. Offenbar breitete sich jetzt auch wieder die Tanne aus, und zwar nicht nur am Alpenrand, sondern auch in den Buchenwäldern des nördlichen Alpenvorlandes. Das natürliche Gewässersystem hatte sich seit der Mittleren Wärmezeit stabilisiert, so dass sich an den Bachrändern dauerhafte Auwälder bilden konnten. Auch hier fanden Ulmen und Eichen ein Rückzugsgebiet. Die Weichholzaue wurde von Weiden und besonders Erlen aufgebaut.

Viehhaltung und Ackerbau nahmen während der Bronze- und Eisenzeit kontinuierlich zu.

*Nachwärmezeit (Subatlantikum; ab 2.750 Jahren vor heute)*

In der frühen Nachwärmezeit kam es in ganz Südbayern zu ausgeprägten Rodungsphasen, von denen die nachhaltigste im Zusammenhang mit der römischen Okkupation (ab 15 v. Chr.) zu sehen ist. Die Buche nutzte man damals vor allem zur Holzkohlegewinnung, die Tanne wurde eher zur Gewinnung von Bauholz gefällt. So wurden Buchen und Tannen von den Römern auch im Alpenvorland dezimiert.

In den Wirren der nachrömischen Zeit nahm die Siedlungsintensität vorübergehend ab. Dadurch ließ der Druck auf die Wälder nach, welche sich in der Folgezeit regenerieren konnten: Buchen erreichten in der Landschaft des Starnberger Sees fast wieder die Bedeutung, die sie rund tausend Jahre zuvor hatten. Es deutet vieles sogar auf eine Ausweitung des „vorrömischen“ Buchenareals hin, wobei die Buche erst jetzt zum beherrschenden Waldbaum des gesamten nördlichen Jungmoränengebietes wurde (Küster 1995).

Schon kurz nach dem Ende der Völkerwanderungszeit stieg die landwirtschaftliche Produktion am Starnberger See wieder an, und

seit dem Frühmittelalter konnten mit dem anspruchslosen Roggen als Hauptanbauart auch ungünstige Lagen „unter den Pflug genommen“ werden (Behre 1981). Dies war unbedingt notwendig, galt es doch, eine ständig wachsende Bevölkerung zu versorgen. Wald musste jetzt mehr und mehr Kulturlächen weichen oder wurde durch Vieheintrieb, z. B. Schweinemast, verändert.

Im Hoch- und Spätmittelalter nahmen die Anteile von Buchen und Tannen in den Wäldern Südbayerns im Gegensatz zu Eichen und Fichten weiter ab. Offenbar wurden erstere geschlagen, letztere aber nicht. Noch später hatte die Landnutzung vielerorts eine regelrechte Waldverwüstung zur Folge; waldzerstörende Nutzungsweisen führten zum allmählichen Ruin der Wälder. In den „Restwäldern“ konnte sich neben Eiche, Fichte und Hasel endgültig auch die Hainbuche etablieren. Dies ist zum Teil auf die bäuerliche Niederwaldwirtschaft zurückzuführen, bei der ausschlagkräftige Baumarten gefördert, die Buche aber dezimiert wurde. Pott (1981, 1985) hat dies als „Hainbucheneffekt“ beschrieben; Resultat war die Bildung zahlreicher Eichen-Hainbuchen-Wälder heutiger Prägung, von denen aber nur wenige als natürlich anzusehen sind (Müller 1990, Küster 1995).

Im 18. Jahrhundert war der Anteil des Waldes in der Kulturlandschaft auf ein Minimum zurückgegangen. Wie viel Gehölzfläche es noch gab, ist nicht festzustellen. Jetzt wurden aufgelassene Ackerstandorte und ehemalige Bauernwälder, die nach forstgeschichtlichen Quellen stark aufgelichtet und nach jahrtausendelanger Übernutzung durch Waldweide (Schweinemast), Streugewinnung und bäuerlichen Holzeinschlag in schlechtem Zustand waren, massiv mit Fichten aufgeforstet.

An den steileren Hängen von Starnberger See und Ammersee behielten Buche und Eiche eine größere Bedeutung, was darauf zurückzuführen ist, dass diese Waldbereiche wohl niemals vollständig zerstört wurden. Die Kiefer konnte sich auf Moorflächen ausbreiten, welche nach Drainage und Torfabbau entwässert wurden.

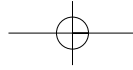
Wie die Beschreibung der Vegetationsgeschichte am Starnberger See beispielhaft zeigt ist die Analyse von Blütenstaub aus Mooren und Seesedimenten eine sehr aussagefähige Methode, um die Entwicklung, den Wandel sowie die Dynamik von Umwelt zu rekonstruieren. Der allgegenwärtige Staub wird mit Hilfe der Pollenanalyse zur Zeitmaschine in die jahrzehntausende alte Vergangenheit der bayerischen Landschaft.

## ANMERKUNG

1) Die Palynologie ist die Wissenschaft von den lebenden und fossilen Sporen- und Pollengenerationen der Pflanzen in Grundlagenforschung und Anwendungsbereichen (Klaus 1987).

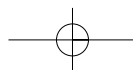
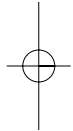
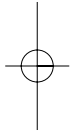
## LITERATUR

- BEHRE, K.-E.: The interpretation of anthropogenic indicators in pollen diagrams. *Pollen et Spores* 23, 1981, S. 225-245.
- BEUG, Hans-Jürgen: Leitfaden der Pollenbestimmung. München 2004.
- BURGA, Conradin A. und Roger PERRET: Vegetation und Klima der Schweiz seit dem jüngeren Eiszeitalter. Thun 1998.
- FAEGRI, Knut und Johannes IVERSEN: Textbook of Pollen Analysis. Chichester 1989.
- FESQ-MARTIN, Martinus, Amei LANG und Michael PETERS: Scherben der Münchshöfener Kultur von der Roseninsel im Starnberger See, Gde. Feldafing, Lkr. Starnberg. – Bayerische Vorgeschbl. 67, 2002, S. 167 ff.
- FIRBAS, Franz: Spät- und nacheiszeitliche Waldgeschichte Mitteleuropas nördlich der Alpen. Band 1 und 2. Jena 1949/52.
- FRIEDMANN, Arne: Die spät- und postglaziale Landschafts- und Vegetationsgeschichte des südlichen Oberrheintieflands und Schwarzwalds. In: *Freiburger Geogr. Hefte* 62, 2000.
- FRIEDMANN, Arne: Moorwelten – Die Moore der Erde. In: *Nationalpark 122 (Sonderheft Moore)*. 2003, S. 4-8.
- KLAUS, Wilhelm: Einführung in die Paläobotanik. Band I. Wien 1987.
- KOSSACK, G. und H. SCHMEIDL: Vorneolithischer Getreidebau im Bayerischen Alpenvorland. *Jahresbericht der Bayerischen Bodendenkmalpflege*, 15/16, 1974/75, S. 7-23.
- KÜSTER, Hansjörg: Postglaziale Vegetationsgeschichte Südbayerns: Geobotanische Studien zur prähistorischen Landschaftskunde. Berlin 1995.
- LANG, Gerhard: Quartäre Vegetationsgeschichte Europas. Jena 1994.
- MÜLLER, T.: Die Eichen-Hainbuchenwälder Süddeutschlands. – *Berichte der Reinhold-Tüxen-Gesellschaft* 2, 1990, S. 121-184.
- PETERS, Michael, Arne FRIEDMANN und Martinus FESQ-MARTIN: Moore als Umweltarchive. -In: *Nationalpark 122*, 2003, S. 14-16.
- POTT, Richard: Der Einfluß der Niederholzwirtschaft auf die Physiognomie und die floristisch-soziologische Struktur von Kalkbuchen-



wäldern. Tuexenia, 1, 1981, S. 233-244.

POTT, Richard: Vegetationsgeschichtliche und pflanzensoziologische  
Untersuchungen zur Niederwaldwirtschaft in Westfalen. Westfäl.  
Mus. Naturkunde, Münster, 47, 1985, S. 1-75.



MARTINUS FESQ-MARTIN, ARNE FRIEDMANN UND HEIKE FESQ

## BLÜTENSTAUB UND ROSENFIEBER

### DIE BEDEUTUNG VON POLLEN IN DER GESCHICHTE VON BIOLOGIE UND MEDIZIN

Die Pollenkörner der Samenpflanzen (Spermatophyten) gehören zusammen mit den Sporen der Farne (Pteridophyten) und Moose (Bryophyten) zu den häufigsten Staubpartikeln mit pflanzlichem Ursprung. Je nach Pflanzenart sind Pollenkörner meist zwischen einem Hundertstel bis zu einem Zehntel Millimeter (10 – 100 µm) groß (Lang 1994). Besonders groß werden die Pollenkörner einiger Nachtkerzengewächse (Onagraceae) zu denen auch die Fuchsien gehören. In ihrer südamerikanischen Heimat werden diese beliebten Zierpflanzen nicht vom Wind oder von Insekten, sondern von Kolibris bestäubt. Mit einem Durchmesser von 108 µm (0,108 mm) müsste ein einzelnes Pollenkorn von *Fuchsia magellanica* (Heusser 1971) mit unbewaffnetem Auge (Auflösungsvermögen 0,1 mm) theoretisch noch zu sehen sein. Die Mehrzahl der Blütenpflanzen produziert jedoch Pollen, der sich als einzelne Körner nicht mehr ohne optische Sehhilfen erkennen lässt (Abb. 1).

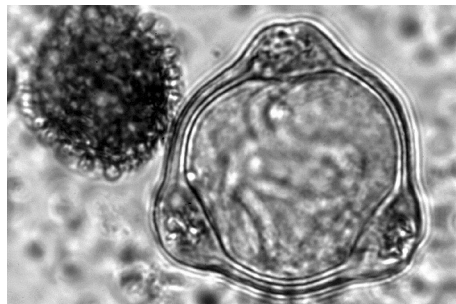


Abb 1: Pollen der Fuchsie unter dem Mikroskop.



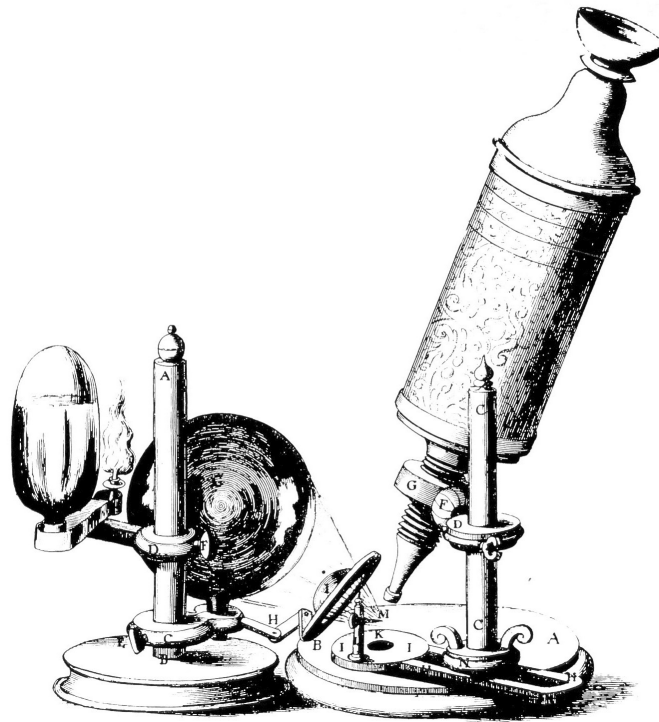


Abb. 2: Mikroskop aus dem Jahr 1665.

Die Erfindung des Mikroskops im 17. Jahrhundert war deshalb die Voraussetzung, um die morphologische Vielfalt von Pollenkörnern erfassen zu können (Abb. 2). Die ersten Forscher, die sich detailliert mit der mikroskopischen Anatomie der Pflanzen befasst haben, waren Marcello Malpighi, Robert Hooke und Nehemia Grew. Insbesondere von Malpighi und Grew liegen systematische Beschreibungen der Feinstruktur von Blütenteilen vor. Nehemia Grew hat erstmals 1678/1680 die Staubgefäße als „männliche“ und die Stempel als „weibliche“ Sexualorgane bezeichnet (Jahn 2000).

### **SAMENSTÄUBCHEN UND POLLINISTEN**

Dass Pollenkörner zur Bildung von Samen notwendig sind, erkannte Johann Gottlieb Gleditsch. Er bestäubte im Jahre 1749 mit Erfolg ein weibliches Exemplar der Palme *Chamaerops humilis* im Berliner Botanischen Garten mit Pollen, den er sich von einem männlichen Exemplar des Leipziger Gartens schicken ließ; den Versuch wiederholte in

den Jahren 1750 und 1751, um erneut die „Früchte“ seines Experiments zu ernten (Mägdefrau 1973). 4863 „Samenstäubchen“ zählte Joseph Gottlob Kölreuter in den neunziger Jahren des 17. Jahrhunderts an einer Hibiscus-Blüte. Er untersuchte, dass 50 bis 60 dieser Pollenkörner genügen, um etwa 30 Samen in der Kapsel hervorzu- bringen (Mägdefrau 1973).

Diese frühen Erkenntnisse über die biologische Funktion des Blütenstaubs werden jedoch in der Folgezeit wieder verworfen. Fast bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts bestanden Zweifel, ob Pflanzen sich zweigeschlechtlich fortpflanzen können (Eisnerova 2000). Im Jahre 1823 machte Giovanni Battista Amici die Entdeckung, dass aus Pollenkörnern, die auf weibliche Narben aufgebracht wurden, Schläuche mit Plasmaströmung auskeimen (Mägdefrau 1973). Mit seinem selbst gebauten Mikroskop gelang es Amici sieben Jahre später sogar zu verfolgen, wie die Pollenschläuche im Griffelgewebe bis in die Mikrophyle der Samenanlage hinunterwachsen.

Dennoch wurde der Pollen für das weibliche Prinzip angesehen. Die „Pollinisten“ Johannes Horkel und Matthias Jacob Schleiden postulierten, dass der Pflanzenembryo nicht im befruchteten Ei, sondern im Endbereich des Pollenschlauchs entstehe, nachdem dieser ins Ei eingedrungen sei (Eisnerova 2000).

Erst Friedrich Wilhelm Hofmeister konnte in der Mitte des 19. Jahrhunderts (1849, 1851) zeigen, dass der aus dem Pollenkorn herauswachsende Pollenschlauch durch den Fruchtknoten zum Embryosack des weiblichen Eis durchdringt, wo die eigentliche Befruchtung erfolgt. In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde diese Beobachtungen von Eduard Strasburger im Detail bestätigt (Eisnerova 2000). 1884 demonstrierte Strasburger erstmals bei Pflanzen, dass der eigentliche Befruchtungsvorgang durch die Verschmelzung des weiblichen und männlichen Zellkerns erfolgt (Mägdefrau 1973, Junker 2004). Damit war für das Pflanzenreich der gleiche Befruchtungsvorgang bestätigt, den Oscar Hertwig bereits 1875 bei Tieren nachgewiesen hatte (Mägdefrau 1973).

Strasburger entdeckte außerdem, dass im Pollenschlauch der Blütenpflanzen (Bedecktsamer, Angiospermen) ein großer, vegetativer Kern und zwei kleine generative Kerne existieren. Einer dieser generativen Kerne verschmilzt mit dem Zellkern der Eizelle; was aber ist die Funktion des zweiten kleinen Kerns im Pollenschlauch? Eine Frage, die erst um die Jahrhundertwende (1898) als „doppelte Befruch-

tung“ durch Sergius Nawaschin beantwortet wurde (Mägdefrau 1973, Eisnerova 2000): Der zweite generative Kern im Pollenschlauch verschmilzt mit dem sekundären Kern des Embryosacks und bildet das Nährgewebe (Endosperm) im künftigen Pflanzensamen.

Die Erforschung der komplexen Vorgänge im Rahmen der Pflanzensexualität, etwa das Auskeimen der Pollenschläuche aus den Austrittsöffnungen (Aperturen) in der Zellwand der Pollenkörner oder die Verschmelzung der generativen Zellen im Embryosack der reifen Samenanlage, bilden heute eine unerlässliche Grundlage für alle Bereiche der modernen Biologie.

### WISSENSRESSOURCEN DER UMWELTGESCHICHTE

Neben der eigentlichen Physiologie des Blütenstaubs wurde ebenfalls im 19. Jahrhundert seine Bedeutung als „Leitfossil“ im Rahmen von paläontologischen Untersuchungen erkannt.

Grundlage der Pollenanalyse ist die gute Erhaltung von Pollen über erdgeschichtlich lange Zeiträume hinweg; ferner lässt sich aufgrund der besonderen Morphologie von Pollenkörnern die Familie, Gattung und vereinzelt sogar die Art der Pflanze bestimmen, die den untersuchten Pollen einst produziert hat. So ist es möglich, mit Pollen aus natürlichen Archiven wie Mooren oder den Sedimenten von Seen, die Vegetation und damit die Umwelt und Landschaft vergangener Zeiträumen zu rekonstruieren.

So beschrieb der Botaniker Heinrich Robert Goeppert um 1840 erstmals tertiärzeitlichen Pollen (Hölder 1989, Lang 1994). Über 75 Jahre später wurde 1916 die quantitative Pollenanalyse durch Lennart von Post eingeführt (Lang 1994). Auf der 16. Skandinavischen Naturforscherversammlung in Oslo hatte von Post zum ersten Mal ein sogenanntes Pollendiagramm präsentiert. Dieses Darstellungsprinzip blieb bis heute die gebräuchlichste Form, um die Ergebnisse vegetationsgeschichtlicher Untersuchungen darzustellen. Während sich in der Anfangsphase die Pollenanalysen weitgehend auf das nördliche und mittlere Europa konzentrierten (Lang 1994), erfolgten nachfolgend zahlreiche Forschungsvorhaben auch in außereuropäischen Regionen. Wiederum tritt der Schwede Lennart von Post als Pionier auf. Von ihm wurde die erste Pollenanalyse in Feuerland durchgeführt (Fesq-Martin 2003). Heute werden in vielen Weltregionen, die natürliche Pollenarchive wie Moore und Seen aufweisen, vegetationsgeschichtliche Untersuchungen über die prähistori-

schen sowie geschichtlichen Abschnitten seit der letzten Kaltzeit (Spätglazial und Holozän) durchgeführt.

Vorausgesetzt es existieren in einem Untersuchungsgebiet entsprechend alte Archive, etwa in Form von Kohle oder Steinsalz, so lassen sich auch Pollen- und Sporenfloren bestimmen, die vor dem Eiszeitalter (Pleistozän) abgelagert wurden. Aus dem Paläophytikum (Silur bis Unter-Perm: 440-260 Millionen Jahre) liegen bereits zahlreiche Sporentypen (Triletes) von Farnen (Pteridophyten) vor (Klaus 1987). Pollen von Gymnospermen (Nacktsamer: Ginkgo-Gewächse, Koniferen, Cycadeen, Bennettiteen, u.a.) dominieren ab dem Mesophytikum die Archive von der oberen Trias, über den Jura bis zur unteren Kreide (260-130 Millionen Jahre). Ein völlig neues Pollenbild taucht erst im älteren Neophytikum (ab Ober-Kreide: 110 Millionen Jahre) mit dem Blütenstaub der Angiospermen (Bedecktsamer, Blütenpflanzen) auf.

### DER NAME DER ROSE

Neben der botanischen und paläontologischen Erforschungsgeschichte des Blütenstaubs finden sich in der Medizingeschichte interessante Quellen, die einen weiteren Aspekt der Bedeutung von Pollen aufzeigen.

Heuschnupfen gehört zu den häufigsten und verbreitetsten Allergiekrankheiten der Gegenwart (Ring 1991). Für den Medizinhistoriker Roy Porter (2000) erfolgte die erste eindeutige Interpretation der Pollinosis im 19. Jahrhundert: „John Bostock (1773–1846) prägte den Begriff „Sommerkatarrh“, und John Elliotson (1791–1868) identifizierte Pollen als „verantwortliches Agens“. Bereits in der frühen Neuzeit entstanden unter dem poetischen Namen „Rosenfieber“ erste Beschreibungen von Pollenallergien. Im Jahre 1556 dokumentiert der portugiesische Arzt Amatus Lusitanus die Leiden eines Mönches, der sich in jedem Frühjahr aus Angst vor dem „unangenehmen Rosenduft“ in sein Zimmer einschloss (Schadewald 1980). Ein anderer Kirchenmann wurde ebenfalls heftig vom „Rosenfieber“ geplagt: Der römische Kardinal Olivieri Caraffi († 1511) ließ vor seinem Palast Wachen aufstellen, die verhindern sollten, dass jemand einen Rosenstrauß zu einer Audienz mitbrachte. „Im Namen der Rose“ geht bereits 1565 der italienische Arzt Leonardo Botallo relativ präzise auf die allergischen Krankheitssymptome ein. Er beobachtete, dass zur Zeit der Rosenblüte ansonsten vollkommen gesunde Menschen unerwartet unter Kopfschmerzen, Niesreiz und einem starken Jucken der Nasenregion litten.

Die historische Bezeichnung des Heuschnupfens wird von Hans Schadewald (1980) in seiner „Geschichte der Allergie“ plausibel interpretiert: „Wir möchten daher aus historischen Gründen der Ansicht zuneigen, dass das Rosenfieber als Symbol für die Pollinosis (Pollenallergie) an sich gegolten hat und man bewusst die edle Pflanze zur Identifizierung des Krankheitsbildes herausstellte.“ So war der Begriff „Rosenfieber“ noch bis ins 19. Jahrhundert gebräuchlich. Das heute verbreitete Synonym „Heuschnupfen“ (engl.: hay fever) bezieht sich ebenfalls nicht nur auf Allergieformen, die ausschließlich von „Heu“-Gräsern (Gramineae) hervorgerufen werden, sondern auf alle von Pflanzenpollen (Hasel, Birke, Beifuß, u.a.) verursachten Krankheitssymptome.

„Ende Mai 1925 erkrankte ich so unangenehm an Heufieber, dass ich Born bitten musste, mich für 14 Tage von meinen Pflichten zu entbinden.“ Der Physik-Nobelpreisträger Werner Heisenberg (1969) liefert eine anschauliche Beschreibung seiner vom „Heufieber“ verschuldeten Leiden: „Ich wollte auf die Insel Helgoland reisen, um in der Seeluft, fern von blühenden Büschen und Wiesen, mein Heufieber auszukurieren. Bei der Ankunft in Helgoland muss ich mit meinem geschwollenen Gesicht einen recht kläglichen Eindruck gemacht haben; denn die Hauswirtin, bei der ich ein Zimmer mietete, meinte, ich hätte mich wohl am Abend vorher mit anderen geprügelt, sie wolle mich aber schon wieder in Ordnung bringen.“

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts untersuchten Clemens Peter von Pirquet und sein Assistent Béla Schick erstmals detailliert die Reaktionen, die eine Exposition von Pollen bei Menschen auslösen können. Pirquet kam zu dem Schluss, dass Antigen-Antikörper-Prozesse der Pollinosis zu Grunde liegen, und bezeichnete den hypersensiblen Zustand, durch den es zu abnormen Reaktionen auf bestimmte Fremdstoffe kommt, als „Allergie“ (Porter 2000).

Gleichgültig, ob „Pollinosis“, „Heuschnupfen“, „Heufieber“ oder „Rosenfieber“ – dass Pollenkörner seit vielen Jahrzehnten und mit großer Wahrscheinlichkeit bereits seit Jahrhunderten Allergiker quälen, mag für die Millionen Betroffenen der Gegenwart ein schwacher Trost sein. Zwischen zehn und 25 Prozent der Bevölkerung zeigen heute die Symptome von Heuschnupfen oder allergischem Asthma; in den letzten Jahren hat sich die Zahl der Betroffenen mehr als verdoppelt. Warum nehmen Pollenallergien zu? Was hat sich verändert – Pollen oder Mensch?

Es gibt zahlreiche Versuche, das Phänomen Heuschnupfen zu erklären. Einige Hypothesen gehen davon aus, dass sich die Oberflächenstruktur der Pollenkörner etwa durch Umweltschadstoffe verändert hat. Der modifizierte Pollen wird vom menschlichen Immunsystem falsch identifiziert und als potentiell Pathogen bekämpft. Andere Erklärungsansätze suchen die Ursache für die Zunahme der Allergien beim Menschen selbst. Durch die deutliche Abnahme von Parasitenbefällen im Kindesalter, insbesondere von Spulwürmern, soll das Immunsystem vieler Allergiker unterfordert oder einseitig trainiert sein. Die Folgen sind sinnlose Überreaktionen des körpereigenen Abwehrsystems auf harmlose Partikel aus der Umwelt – etwa Pollenkörner.

Blütenstaub ist in der menschlichen Umwelt allgegenwärtig. Als Auslöser für allergische Erkrankungen (Rhinokonjunktivitis, allergischem Asthma, atopisches Ekzem) führt er insbesondere in den Frühlings- und Sommermonaten zu einer deutlichen Beeinträchtigung der Gesundheit bei Teilen der Bevölkerung.

Im Gegensatz dazu steht die wichtige natürliche Bedeutung des Blütenstaubes. Zugleich ist er eine wissenschaftliche Ressource zur Rekonstruktion von vergangenen Umwelten, Landschaften und damit schließlich der Dynamik von Natur.

#### LITERATUR

- AAS, K., N. ABERG, C. BACHERT, K. BERGMANN, R. BERGMANN, S. BONINI, J. BOUSQUET, A. de WECK, I. FARKAS, K. HEJDENBERG: European Allergy White Paper: Allergic Diseases as a Public Health Problem. The UCB Institute of Allergy. Brussels 1997.
- BEHRENDT, H., W.M. BECKER, C. FRITZSCHE, W. SLIWA-TOMCZOK, J. TOMCZOK, K.H. FRIEDRICH, J. RING: Air Pollution and Allergy: Experimental Studies on Modulation of Allergen Release from Pollen by Air Pollutants. *Int. Arch Allergy Immunol.* 113, 1997, S. 69-74
- EISNEROVA, V.: Botanische Disziplinen. In: Jahn, I (Ed. 2000): *Geschichte der Biologie*. Heidelberg 2000, S. 314-317
- FESQ-MARTIN, Martinus: Pollenanalytische Untersuchungen zur Rekonstruktion der spät- und postglazialen Vegetationsdynamik des Magellanischen Regenwaldes, Südchile. Thesis ([www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/697/](http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/697/)), Geowissenschaftliche Fakultät, Universität Freiburg 2003.
- JAHN, Ilse: *Naturphilosophie und Empirie in der Frühaufklärung (17. Jh.)*. In: Ilse Jahn (Hg.): *Geschichte der Biologie*. Heidelberg 2000, S. 204-213.

- JUNKER, Thomas: Geschichte der Biologie. München 2004.  
KLAUS, Wilhelm: Einführung in die Paläobotanik. Band I. Wien 1987.  
LANG, Gerhard: Quartäre Vegetationsgeschichte Europas. Jena 1994.  
MÄGDEFRAU, Klaus: Geschichte der Botanik. Stuttgart 1973.  
PORTER, Roy: Die Kunst des Heilens. Heidelberg 2000.  
RING, Johannes: Epidemiologie allergischer Erkrankungen. München 1991.  
RING, Johannes: Angewandte Allergologie. München 1995.  
SCHADEWALDT, Hans: Geschichte der Allergie. 4 Bände. München 1980-84.

## B. DIESELRUSS UND HAUTSCHUPPEN:

### STAUB DER MENSCHEN

Auch wenn der Großteil des atmosphärischen Staubes natürlichen Ursprungs ist, kann der Mensch doch lokal soviel Staub aufwirbeln, dass die Luft undurchsichtig wird – wie etwa in den sogenannten Megacities, in Kairo, Mexiko-City oder Peking. In Europa ist der Schwebstaubgehalt der Luft in den letzten Jahren hingegen kontinuierlich gesunken – Erfolg einer klugen Umweltpolitik. Dennoch entstehen immer wieder neue Stäube und damit möglicherweise auch neue Gefahren für Umwelt und Gesundheit: die Feinstäube, die gegenwärtig in der Diskussion stehen, oder auch die nanoskaligen Materialien.



RAINER REMUS

## STAUB – DIE UNTERSCHÄTZTE GEFAHR

Der Mensch lebt schon immer mit Staubemissionen. Ein Rückblick zeigt, dass Staub seit jeher zu den klassischen und lange bekannten Luftschadstoffen gehört. Ja, man kann sagen, dass er den Menschen seit Anbeginn verfolgt, seit Menschen Höhlen besiedelten und in diesen Höhlen Feuer entfachten. Da diese Höhlen oftmals keine Lüftungen aufwiesen, muss man vermuten, dass die Steinzeitmenschen in Qualmwolken lebten. Und tatsächlich weisen mumifizierte Körper von Steinzeitmenschen vielfach geschwärzte Lungen auf. Mit den ersten Städten breitete sich der menschgemachte Staub weiter aus und schwebte nun nicht als Dunst in der Höhle, sondern zog durch die engen Gassen der großen Ansiedlungen. Mit der Einführung der Kohlefeuerung in den Städten erhöhte sich die Partikelfracht der Stadtluft ein weiteres Mal und erreichte neue Höhepunkte mit der Industrialisierung. Rauch und Ruß belasteten die Umgebung aller neuen Industriegebiete.

Vor 130 Jahren beschrieb der Dichter Robert Southy die Londoner Luft Anfang des 19. Jahrhunderts als „Gemisch aus Sumpfnebel, Schornsteinrauch, Rußflocken und pulverisiertem Pferdemit“. Ein anderer Chronist beschreibt 1874 Staub der Stadtluft wie folgt: „In den Städten besteht der Staub namentlich aus zerriebenen Hafersegmenten des Pferdemit; es sind aber auch allerlei Fragmente von Kleidern, Teppichen, Federn, Zellen der Oberhaut, Spinnfäden, Steinen, pflanzlichen Stoffen, vor allem stets Stärkekörner nachgewiesen worden.“ In diesen Bemerkungen spiegelt sich zum einen der Stand der damaligen Analysetechnik wieder. Außerdem wird Staub immer direkt mit der Quelle in Zusammenhang gebracht. Staub ist für diese Autoren das, was man sieht und kennt. Ruß wurde erst in Flockengröße wahrgenommen. Besonders deutlich waren die lästigen direkt sichtbaren Auswirkungen, zum Beispiel, dass die Wohnräume und die

Wäsche schnell verschmutzten. Zugleich spiegelt sich in den Angaben auch die ganz andere Umwelt: Autos gab es noch keine in den Städten, stattdessen aber Unmengen von Pferdefuhrwerken.

Im Zuge des industriellen Fortschritts nahmen diese als lästig empfundenen Begleiterscheinungen zunächst zu. In der schottischen Industriestadt Glasgow atmeten die Einwohner noch in den 50er Jahren pro Jahr etwa ein Kilogramm Ruß ein. Auch in Deutschland wurde erst seit 1960 mit Maßnahmen gegengesteuert. In anderen Ländern, wie etwa Südkorea, Taiwan, China, auch in vielen Ländern Osteuropas, dauerte es noch bis in die 80er Jahre, bis erste Maßnahmen eingeleitet wurden.

### ENTWICKLUNG DER STAUBEMISSIONEN IN DEUTSCHLAND

In Deutschland sind die Staubbefreiungen aus Industrieanlagen und Feuerungsanlagen als Folge der seit 1960 eingeleiteten Maßnahmen erheblich zurückgegangen. Besonders durch strenge gesetzliche Vorschriften und die darin festgelegten Emissionsbegrenzungen, etwas für Staub aus Feuerungs- und Industrieanlagen, sind in Deutschland die vom Menschen verursachten Staubemissionen von einstmal 3 Millionen Tonnen 1970 (berechnet für Gesamtdeutschland) auf 1,85 Millionen Tonnen 1990 und seitdem nochmals deutlich auf ca. 250.000 Tonnen (250 kt) im Jahr 2000 zurückgegangen. Ursache für den deutlichen Rückgang seit 1990 war vor allem der Neubau und die Stilllegung von Anlagen, insbesondere Kraftwerken, in den neuen Ländern.

Tab. 1: (Fein-)Staubemissionen aus stationären Quellen in Deutschland im Jahr 2000 (Immissionsschutz 1-04).

Quellgruppe	Gesamtstaub <sup>1</sup> in kt (Kilotonnen)	Feinstaubanteil <sup>2</sup> in %	Feinstaub in kt	Anteil am Gesamtfeinstaub
Industrieprozesse	99,0	60	59,4	49,1
Kraft- und Fernheizwerke	23,0	95	21,9	18,1
Industrie- feuerungen	6,0	95	5,7	4,6
Feuerungsanlagen der Haushalte und Kleinverbraucher <sup>3</sup>	26,4	97	25,5	21,1
Schüttgut- umschlag	43,0	20	8,6	7,1
Summe	197,4		121,1	100,0

1) Vorläufige Angaben, Stand April 2003

2) Schätzung des Umweltbundesamtes, Stand Dezember 1999

3) gerundete Angaben ; Anlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV

Bei den stationären Anlagen sind die Hauptemittenten für anthropogene Feinstaubemissionen die Industrieprozesse (ca. 59,4 kt), dabei vor allem die Eisen- und Stahlerzeugung (ca. 35 kt) und die Steine/Erden-Industrie (13 kt), gefolgt von Kraftwerken und Industriefeuerungen (27,6 kt), den Feuerungen aus Haushalten und Kleinverbrauchern (ca. 25,5 kt) und dem Schüttgutumschlag (ca. 8,6 kt). Hinzu kommen ca. 54 kt Gesamtstaub aus dem gesamten Verkehrsbereich, der vollständig dem Feinstaub zugerechnet werden kann. In der Summe ergeben sich somit ca. 175 kt Feinstaub.

Während aber die Quantität der Staubbelastung deutlich abgenommen hat, weist die Qualität des Staubes im Hinblick auf Partikelgröße und -anzahl sowie der Art und Zusammensetzung heute teilweise ein höheres Gefahrenpotenzial auf als in vorindustriellen Zeiten. Viele Stäube oder Staubinhaltsstoffe gab es in der Luft entweder gar nicht oder aber in wesentlich geringerer Konzentration, z. B. Schwermetalle, Asbest und bestimmte an Staub angelagerte organische Stoffe, unter anderem Dioxine.

#### FEINSTAUB – WAS IST DAS EIGENTLICH?

Im Hinblick auf die Beschreibung von Staub wurden in der Vergangenheit vielfältige Definitionen und Konventionen getroffen. Danach ist Staub ein komplexes Gemisch aus festen und flüssigen Partikel. Dieses Gemisch wird auch Aerosol genannt. Atmosphärisches Aerosol umfasst einen Partikelgrößenbereich zwischen einigen Nanometern ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) bis hin zu einigen hundert Mikrometern ( $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} = 1 \text{ Tausendstel Millimeter}$ ). Das menschliche Auge kann einzelne Teilchen bis ca.  $50 \mu\text{m}$  erkennen.

Für die Beschreibung von Partikel unterschiedlicher Form und Dichte wurde der „aerodynamische Durchmesser“ eingeführt. Der aerodynamische Durchmesser entspricht dem Durchmesser, den ein kugelförmiges Partikel mit der Dichte  $1 \text{ g/cm}^3$  haben müsste, damit es die gleiche Sinkgeschwindigkeit aufweisen würde wie ein Teilchen anderer Form und Dichte. Für Feinstaub wird üblicherweise die aus dem Englischen stammende Bezeichnung PM (**P**articulate **M**atter) gefolgt von der Angabe des aerodynamischen Durchmessers in  $\mu\text{m}$  verwendet.  $\text{PM}_{10}$  umfasst ein Partikelkollektiv, das ein Abscheidesystem passiert, welches in seiner Wirkung der theoretischen Trennfunktion eines Sedimentabscheiders entspricht, der Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser von  $10 \mu\text{m}$  zu 50 Prozent abscheidet (vgl. auch

Abb. 2). Durch diese Festlegungen soll eine Analogie zum menschlichen Atemtrakt hergestellt werden, in dem sich Partikel unterschiedlicher Größe mit gewissen Wahrscheinlichkeiten ablagern.

Ab einer Partikelgröße von  $0,5\ \mu\text{m}$  ist die Diffusion die bestimmende Einflussgröße, weshalb die Beschreibung der Partikel kleiner  $0,5\ \mu\text{m}$  durch den „Diffusions-Äquivalentdurchmesser“ erfolgt. Entscheidend für diese Partikel ist, dass sie aufgrund ihrer Größe keiner nennenswerten Sedimentation unterliegen, dass heißt, sie sinken nicht durch Schwerkraft und bleiben sehr lange in der Atmosphäre.

Üblicherweise wird die Masse an Feinstaub (PM) pro Volumen ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) angegeben, also als Massenkonzentration. Es ist üblich, die Fraktion zwischen  $2,5$  und  $10\ \mu\text{m}$  als „Grobstaub“ und die Fraktion kleiner  $2,5\ \mu\text{m}$  als „Feinstaub“ zu bezeichnen. Teilchen kleiner als  $0,1\ \mu\text{m}$  werden häufig als Ultrafeinstaub bezeichnet (Abb. 1).

Wie man in Abbildung 1 erkennen kann, reichen auch vom Menschen erzeugte Partikel (insbesondere die aus Verbrennungsprozesse wie Ruß, Tabakrauch), aber auch metallurgische Rauche und Stäube bis in den gefährlichen Fein- und Ultrafeinstaubbereich hinein. Grobstäube resultieren vor allem aus nicht-thermischen, mechanischen gewerblichen und industriellen Prozessen, der Lagerung und dem Umschlag von Gütern und insbesondere der Aufwirbelung von Bodenstaub.

Typische natürliche Staubquellen sind z. B. die Meeresgicht (Feinsalze), Vulkane, biogene Teilchen wie Sporen, Pollen, Bakterien und Viren.

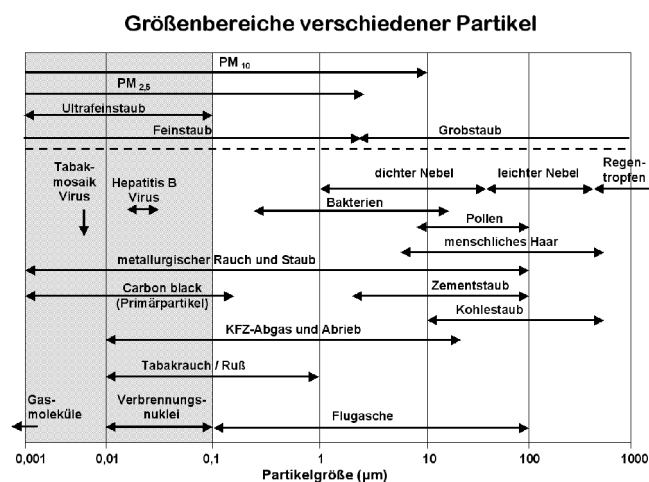


Abb. 1: Korngrößen verschiedener fester und flüssiger Partikel.<sup>1</sup>

## WIRKUNGSMECHANISMEN VON SCHWEBSTAUB

Die Staubteilchen, die sich nur langsam absetzen, also in der Atmosphäre „schweben“ bezeichnet man als (Gesamt-)Schwebstaub. Aus dem Englischen stammt der Begriff Total Suspended Particulates (TSP). Definitionsgemäß handelt es sich um Teilchen kleiner als  $PM_{30} \mu m$ . Sie bilden die sogenannte Umgebungs- oder auch Immissionskonzentration.

Untersuchungen über die Wirkung des Schwebstaubes auf Atemwege und das Herz-Kreislaufsystem belegen, dass die schädigende Wirkung des Feinstaubes zunimmt, je kleiner die Partikel sind und je tiefer sie in die Lunge eindringen. Daraus folgt: Je kleiner, desto gemeiner. Dies ist in Abbildung 2 graphisch dargestellt. Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von  $>10 \mu m$  werden im oberen Lungenbereich abgeschieden; kleine Partikel mit Durchmessern von 10 bis  $2,5 \mu m$  dringen tiefer in die Lunge bis in feinste Bereiche (Alveolen) vor, den die Fraktion um  $1 \mu m$  fast vollständig erreicht. Auch wenn noch einige Fragen hinsichtlich der Wirkungsmechanismen und der Zuordnung von Effekten zu bestimmten Partikelgrößen offen sind, so zeigen die Untersuchungen doch, dass die Belastung durch Feinstaub eindeutig mit Gesundheitseffekten verbunden ist. Als Symptome können Husten, Bronchitis, Lungenentzündungen, Beeinträchtigungen der Herz-Lungenfunktion sowie Lungenkrebs beobachtet werden, die im Endeffekt zu einer verkürzten Lebenserwartung beitragen.

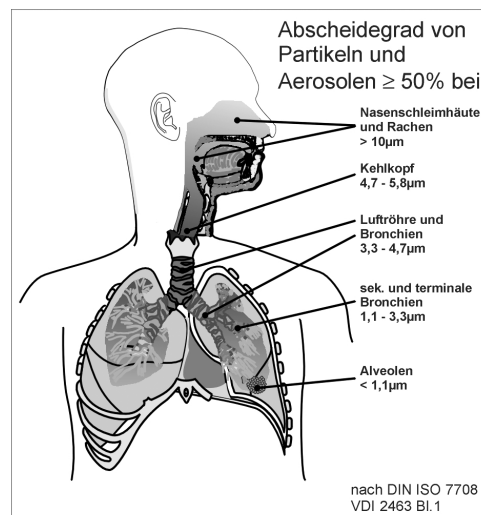


Abb. 2: Wahrscheinlichkeit für Schwebstaub unterschiedlicher Größe in verschiedene Bereiche der Atemwege vorzudringen (nach DIN ISO 7708).<sup>1</sup>

Die Partikel unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Größe, Form, Farbe, chemischen Zusammensetzung und ihren physikalischen Eigenschaften je nach Herkunft bzw. Entstehung. Tabelle 2 zeigt die typische Zusammensetzung einer Stadtluftfeinstaubprobe.

Tab. 2: Hauptinhaltsstoffe von Feinstaub in der Stadtluft (UBA Jahresbericht 1999).  
Angabe in Gewichtsprozent:  $\mu\text{m}$  = 1 Tausendstel Millimeter.

Teilchendurchmesser ( $\mu\text{m}$ )	< 2,5	< 10
Siliciumdioxid	3	26
Ruß	14	6
org. Verbindungen	17	13
Wasser	17	6
Ammonium Ionen	10	2
Chlorid Ionen	2	3
Nitrat Ionen	10	6
Sulfat Ionen	21	8
restliche Metalloxide	6	30

Organische Verbindungen wie PAK (polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe) und Ruß entstehen bei unvollständiger Verbrennung. Sie sind oftmals krebserzeugend. Für die Feinstaubbelastung besonders relevante Quellen sind Feuerungsanlagen der Haushalte und gewerbliche Kleinverbraucher, Industrief Feuerungen, Kraftwerke und besonders Motoren und hier vor allem Dieselmotoren. Dabei denkt man zuerst an KfZ- und LKW-Motoren, nicht zu vernachlässigen sind aber auch Motoremissionen aus Maschinen, Lokomotiven und Schiffen. Ruß entsteht auch durch Abrieb von Reifen, die aus bis zu 30 Prozent aus Ruß bestehen.

Siliciumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) findet sich in Gesteinen und im Sand.  $\text{SiO}_2$ -Partikel gelangen vor allem durch Verwitterung, Abwehungen und Aufwirbelungen, Straßenabrieb aber z. B. auch bei der Rohstoffgewinnung und durch Bautätigkeiten in die Atmosphäre, sind aber überwiegend der Grobstaubfraktion zuzuordnen.

Gegenüber solchen direkten Partikelfreisetzen (primäre Feinstaubemissionen) gibt es auch solche, die sich aus Vorläuferstoffen

(Ammoniak, Chlor, Stickstoffoxide und Schwefeldioxid) bilden, die gasförmig freigesetzt werden und sich dann in der Atmosphäre zu Partikel umwandeln (sekundäre Feinstaubemissionen) und überwiegend aus anorganischen Salzen (Ammonium-, Chlorid-, Nitrat- und Sulfat-Ionen) bestehen. Diese Reaktion wird als Gas to Particle Conversion (GPC) bezeichnet.

Metalloxide, Schwer- und Edelmetalle gelangen z. B. aus der Metallindustrie, aus Katalysatoren und durch Abrieb von Bremsen und Kupplungen in die Luft.

Die atmosphärische Aufenthaltszeit von Partikel wird auch als „Lebensdauer“ bezeichnet. Die Lebensdauer in der bodennahen Atmosphäre hängt wesentlich von der Größe der Partikel ab. Kleine Teilchen (0,001 bis 0,05  $\mu\text{m}$ ) können sich aufgrund der hohen diffusiven Eigenbeweglichkeit leicht miteinander zu größeren Partikel verbinden (koagulieren), die anschließend durch die Erdanziehung sedimentieren. Größere Teilchen als 30  $\mu\text{m}$  weisen eine Lebensdauer von wenigen Stunden bis Minuten auf. Im Bereich der Partikelgrößen zwischen 0,1 und 5  $\mu\text{m}$  spielen Koagulation und Sedimentation keine so große Rolle. Dies ist daher der Größenbereich mit der längsten Lebensdauer und gleichzeitig liegt hier die Hauptmasse des atmosphärischen Feinstaubes. Eine Deposition dieser Fraktion findet vornehmlich durch Niederschläge statt. Während der langen Aufenthaltszeit in der Atmosphäre können kleine Teilchen große Entfernungen zurücklegen. So kann beispielsweise auf den kanarischen Inseln aber auch in Deutschland Saharastaub gefunden werden.

### **AKTUELLE IMMISSIONSSITUATION FÜR FEINSTAUB ( $\text{PM}_{10}$ )**

Bund und Länder messen derzeit an ca. 420 Staubbmessstationen in Deutschland  $\text{PM}_{10}$ . Zusätzlich wird die  $\text{PM}_{10}$ -Belastung an ca. 200 weiteren Messstellen anhand der Gesamtschwebstaub-(TSP-)Konzentration geschätzt. Im Durchschnitt liegt der  $\text{PM}_{10}$ -Anteil des TSP bei ca. 83 Prozent und der Anteil von  $\text{PM}_{2,5}$  an  $\text{PM}_{10}$  bei ca. 40 bis 90 Prozent (im Mittel ca. 70 Prozent), so dass sich auch für  $\text{PM}_{2,5}$  Schätzungen mittels TSP bzw.  $\text{PM}_{10}$  anstellen lassen.

Ein Vergleich derzeitiger Messwerte und Berechnungen anhand dieses Durchschnittswertes lässt erkennen, dass die Feinstaubbelastung in Deutschland seit 1980 deutlich zurückgegangen ist. Typische Konzentrationen an industrie-, stadt- und verkehrsnahen sowie ländlichen Standorten zeigt Tabelle 3.

Tab. 3: Typische Konzentrationsbereiche von PM<sub>10</sub> im Jahr 2001 an deutschen Messstationen (KRdL, Juli 2003)

Standort Messstation	ländlich	städtischer Hintergrund	verkehrsnah	Nähe Schwerindustrie (mit diffusen Quellen)
Jahresmittel [µg/m³]	10-18	20-30	30-45	30-40
Anzahl der Tage mit Tagesmittel >50 µg/m³	0-5	5-20	15-100	50-90
Spitzenwerte, Tagesmittel [µg/m³]	50-70	60-100	70-150	100-200

Feinstäube werden aus den unterschiedlichsten Quellen freigesetzt. Sie können natürlichen Ursprungs oder vom Menschen verursacht (anthropogen) sein, direkt als Staub oder indirekt aus Vorläuferstoffen (primär oder sekundär (s.o. GPC)) freigesetzt werden, aus mobilen oder stationären Quellen, und sie können aus diffusen oder aus definierten Auslässen austreten.

Nationale Minderungsmöglichkeiten bestehen prinzipiell bei allen Quellen mit Ausnahme der natürlichen Emissionen. Die Belastung durch Ferntransport kann nur durch internationale Maßnahmen sinnvoll vermindert werden.

Eine Schweizer Untersuchung ergab, dass selbst an abgelegenen Messstellen eine relativ konstante Hintergrundbelastung für PM<sub>10</sub> zwischen 6 und 12 µg/m³ gemessen wird, die sich aus natürlichen Emissionen und ferntransportierten Partikel ergibt.

Eine grobe Schätzung besagt, dass der in der Luft befindliche Staub in Deutschland zu ca. 1/3 aus natürlichen Quellen stammt (in Städten 1/6), zu 1/3 (in Städten 1/2) aus dem Verkehr einschließlich Reifen-, Bremsen- und Straßenabrieb sowie (Wieder) Aufwirbelung und zu 1/3 aus anderen anthropogenen Quellen (diffuse, primäre und sekundäre Staubemissionen aus Industrie, Gewerbe und Haushaltsfeuerungen).

In Städten dominiert der Verkehr die Feinstaubbelastung. Bei den mit dem Abgas von Motoren emittierten Partikelemissionen handelt es sich vollständig um Feinstaub PM<sub>10</sub>, überwiegend sogar um Feinstaub kleiner als PM<sub>2,5</sub>. Die Partikelgrößen von Dieselmotoren liegen zwischen 0,01 und 1,0 µm mit zwei Verteilungsmaxima bei 0,03 und 0,1 µm. Das bedeutet, dass die Emissionen aus dem Verkehr zwar relativ wenig zum PM<sub>10</sub>-Massenanteil beitragen, gleichwohl einen großen Anteil hinsichtlich der Partikelzahl haben. Beim Reifenabrieb



zeigen Untersuchungen, dass es sich dabei im Wesentlichen um gröbere Partikel handelt. Hinzu kommen verkehrsbedingte Emissionen durch den Abrieb von Brems- und Kupplungsbelägen und Straßenbelägen. Für den Verkehr ist anzumerken, dass die Emissionen aufgrund der niedrigen Quellhöhen einen überproportionalen Immissionsbeitrag leisten. Der Straßenverkehr des Transitlandes Deutschland wird weiter zunehmen. Umso wichtiger ist die Zusage der Autoindustrie, alle neuen Diesel-PKW bis 2008 mit Partikelfilter auszurüsten, die über 99 Prozent Feinpartikel zurückhalten. Auf Gesetzesebene laufen an vielen Stellen Arbeiten, das Abgasverhalten von PKW sowie von leichten und schweren Nutzfahrzeugen weiter zu verbessern.

Hinzuweisen ist auf das europäische CAFE-Programm (Clean Air for Europe). Gegenstand dieses Programm wird ein europaweiter Grenzwert ab 2010 im Rahmen einer neuen PKW-Abgasnorm EURO V sein. Unabhängig davon sollen saubere Diesel ab 2005 steuerlich gefördert werden.

Weitere internationale Regelungen sind z. B. die Richtlinie zur integrierten Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie). Durch die IVU-Richtlinie und den darin festgelegten Informationsaustauschprozess, mit dem eine Harmonisierung in Europa erreicht werden soll, werden Anforderungen an die Besten Verfügbaren Techniken (BVT) formuliert. In den branchenbezogenen BVT-Merkblättern werden die besten Maßnahmen zur Minderung von Emissionen und auch Anforderungen an die Behandlung diffuser Emissionen formuliert. Besonders zu erwähnen ist das Merkblatt über „Emissions from storage“, das die BVT beim Umschlag und Lagern von festen, flüssigen und gasförmigen sowie gefährlichen Stoffen beschreibt.

Im Hinblick auf den grenzüberschreitenden Ferntransport von Partikel und von Vorläuferstoffen wie Schwefeldioxid und Ammoniak müssen internationale Vereinbarungen her. Deutschland unterstützt deshalb die Aufnahme von Feinstaub ( $PM_{10}$ ) in die Stoffliste einer internationalen Vereinbarung zur Begrenzung bestimmter Schadstoffe (Multikomponenten-Protokoll).

### NEUE EUROPÄISCHE GRENZWERTE FÜR FEINSTAUB

Aufgrund der neueren Erkenntnisse über die Gefährlichkeit des Feinstaubes hat die Europäische Kommission eine neue EU-Richtlinie erlassen, die im Juli 2001 in nationales Recht umgewandelt wurde. Die Anforderungen die sich hieraus für  $PM_{10}$  ergeben sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tab. 4: Anforderungen der 1. Tochterrichtlinie zur Luftqualitätsrahmenrichtlinie für Partikel (PM<sub>10</sub>) in der Luft zum Schutz der menschlichen Gesundheit.

	Mittelungszeitraum	Grenzwert	Zeitpunkt, bis zu dem der Grenzwert zu erreichen ist
<b>Stufe 1</b>	24 Stunden	<b>50 µg/m<sup>3</sup> PM<sub>10</sub></b> dürfen nicht öfter als 35 mal/Jahr überschritten werden	1. Januar 2005
Jahresgrenzwert	Kalenderjahr	<b>40 µg/m<sup>3</sup> PM<sub>10</sub></b>	
<b>Stufe 2</b>	24 Stunden	<b>50 µg/m<sup>3</sup> PM<sub>10</sub></b> dürfen nicht öfter als 7 mal/Jahr überschritten werden	1. Januar 2010
Jahresgrenzwert	Kalenderjahr	<b>20 µg/m<sup>3</sup> PM<sub>10</sub></b>	

Ab Anfang Januar 2005 wird es ernst! Dann müssen überall in allen Mitgliedstaaten der EU die neuen Immissionswerte der ersten Stufe (s. Tab. 4) eingehalten werden. Danach darf die PM<sub>10</sub>-Konzentration von 50 µg/m<sup>3</sup> im Tagesmittel an höchstens 35 Tagen im Jahr überschritten sein. Im Jahresdurchschnitt darf die PM<sub>10</sub>-Konzentration maximal 40 µg/m<sup>3</sup> betragen. Die neuen Immissionsgrenzwerte stellen gegenüber den bisherigen Grenzwerten eine drastische Verschärfung um den Faktor 4 bis 5 dar. Ab Januar 2010 tritt in einer 2. Stufe eine weitere Verschärfung ein. Der Tagesmittelwert darf dann nur noch an sieben Tagen überschritten werden und der Jahresmittelwert wird auf 20 µg/m<sup>3</sup> halbiert. Insbesondere dieser Wert wird nach den derzeitigen Erkenntnissen nur schwer einzuhalten sein. Außerdem wird zur Zeit diskutiert, ob nicht auch für PM<sub>2,5</sub> eine Begrenzung eingeführt werden muss.

Ein Vergleich der ab 1. Januar 2005 geltenden Grenzwerte mit den Messwerten aus Tabelle 3 zeigt, dass der Jahresgrenzwert von 40 µg/m<sup>3</sup> lediglich noch an Schwerpunkten der Immissionsbelastung, also an verkehrsnahen Standorten überschritten wird. Problematisch erscheint allerdings die Einhaltung des Tagesmittelwertes von 50 µg/m<sup>3</sup> über die geforderte Anzahl an Tagen an verkehrsnahen und industriegeprägten Standorten. Sowohl die Anzahl der Überschreitungen als auch die Höhe der Spitzenwerte reichen deutlich über den Grenzwert hinaus.

### **INTEGRIERTES UMSETZUNGS- UND MASSNAHMENKONZEPT**

Die Bundesregierung hat die Minderung der Feinstaubbelastung zum politischen Schwerpunktthema erhoben. Dazu mussten und müssen auch im Zuge der nationalen Umsetzung der europäischen Anforderungen in Deutschland Änderungen an gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerken vorgenommen werden. Zu nennen wäre die Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) und insbesondere der 22. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchV) (Verordnung über Immissionswerte) sowie der 33. BImSchV (Verordnung zur Verminderung von Sommersmog, Versauerung und Nährstoffeinträgen). Die Neufassung der 22. BImSchV enthält die neuen Immissionsgrenzwerte der EU sowie eindeutige und vollziehbare Regelungen, die sich sowohl an die Behörden wie auch an Betreiber von Anlagen, Verkehrsteilnehmer bis hin zum einzelnen Bürger richtet. Konsequenzen für den Einzelnen ergeben sich aus Maßnahmen- oder Aktionsplänen der Länder und den daraus abgeleiteten Einzelmaßnahmen in Ballungsgebieten (z. B. teilweises oder vollständiges Fahrverbot im Falle von längerfristigen Überschreitungen der Grenzwerte). Erforderlich ist auch eine kontinuierliche Information der Bevölkerung über die Luftqualität. Die 33. BImSchV zur Verminderung von Sommersmog, Versauerung und Nährstoffeinträgen zielt vor allem auf sekundäre Partikel aus Vorläuferstoffen ab, die sich in der Atmosphäre zu Partikel umwandeln können.

Weiterhin erfolgte eine Berücksichtigung der neuen Anforderungen in der 2002 novellierten „Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft“ (TA Luft). Diese Verwaltungsvorschrift ist die wichtigste Vorschrift für industrielle Anlagen. Sie regelt auch die Genehmigung neuer Anlagen. Vor einer Erteilung einer Genehmigung ist durch Modellrechnungen nachzuweisen, dass die von der Anlage ausgehenden Luftverunreinigungen nicht zu einer Überschreitung der Immissionswerte der TA Luft führen. Dieses Genehmigungserfordernis wurde bei der Novellierung der TA Luft auf PM<sub>10</sub> ausgeweitet.

Die TA Luft enthält außerdem anspruchsvolle, am Stand der Technik ausgerichtete Emissionswerte für genehmigungsbedürftige Anlagen. Zur Einhaltung der Emissionswerte für Staub und gasförmige Stoffe werden bei gefassten oder definierten Emissionen in der Regel leistungsfähige Abscheider für staub- und gasförmige Stoffe eingesetzt. Im Bereich der Stickstoffoxidminderung ist durch verstärkte Anwendung von Katalysatoren eine weitere Reduktion zu erwarten.

Besonderes Augenmerk gilt den diffusen Quellen. Das sind Quellen, die im Allgemeinen eine große räumliche Ausdehnung haben. Charakteristisch für diffuse Quellen ist, dass die Emissionen in niedriger Höhe (Quellhöhe) freigesetzt werden und dass kein definierter Auslass besteht. Durch die niedrige Quellhöhe sind sie besonders für die Belastung im Nahbereich von Anlagen relevant. Nach den deutlichen Reduktionen der Staubemissionen aus gefassten Quellen treten die diffusen Quellen immer mehr in den Vordergrund. Aufwändige Messungen von prozessbedingten diffusen Staubemissionen in der Metallindustrie ergaben, dass in der Metallindustrie mittlerweile ca. 80 Prozent der Feinstaubemissionen nicht durch den Schornstein, sondern aus Dachöffnungen, Hallentoren oder Fenstern emittiert werden. Diese diffusen Emissionen sowie solche aus Umschlag- und Lagerprozessen sind durch den Einsatz von Staubabscheidern nur mit großem Aufwand zu mindern. Voraussetzung wäre die weitgehende Erfassung und Absaugung der staubhaltigen Abluft, was oftmals bei diesen Quellen nicht oder nicht wirtschaftlich möglich ist. Für diffuse Emissionen enthält die TA Luft keine besonderen Emissions(„grenz“)werte. Stattdessen versucht man hier durch vorbeugende Maßnahmen das Entstehen von Staub zu verhindern (z. B. Befechten, Einhausen) oder zu minimieren (z. B. Reinigung von Hallen, Wegen und Straßen, emissionsarme Umschlaggeräte). Sofern dies nicht möglich ist, sollen diffus aus Prozessen austretende Emissionen gezielt und möglichst effektiv erfasst und somit in gefasste oder geführte Emissionen überführt und ggf. einer Minderungstechnik zugeführt werden. Dazu enthält die TA Luft zahlreiche Konkretisierungen und Anforderungen in den besonderen Regelungen für bestimmte Anlagenarten.

Weitere diffuse primäre Staubquellen, die nicht unerheblich zur Staubbelastung beitragen können, sind zum Beispiel die Landwirtschaft, insbesondere bei Erntevorgängen, die Rohstoffgewinnung wie z. B. der Abbau von Bims und anderen Gesteinen, Bauarbeiten z. B. an Straßen und Gebäuden, oder auch Sandstrahlarbeiten, Brände sowie die Wiederaufwirbelung sedimentierten Staubes durch den Wind. Aus der Landwirtschaft wird neben primären Partikel vor allem Ammoniak als Vorläuferstoff emittiert. Durch ein spezielles Minderungsprogramm der Bundesregierung sollen die jährlichen Ammoniakemissionen von derzeit 567 kt auf 400 kt ab dem Jahr 2010 gesenkt werden.

Berücksichtigung findet die Feinstaubproblematik auch bei den laufenden Aktivitäten zur Novellierung der 1. BImSchV (Kleinfeuerungsanlagenverordnung) und der 13. BImSchV (Großfeuerungsanlagenverordnung). Beide Anlagenbereiche sind für einen Großteil der primären Partikelemissionen sowie der Emissionen von Vorläuferstoffen verantwortlich. Im Bereich der 1. BImSchV kann eine besondere Minderung der direkten Staubemissionen durch primäre Maßnahmen insbesondere im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher erreicht werden. Dazu gehören vor allem Energiesparmaßnahmen und Brennstoffumstellung (weg von Festbrennstoffen wie Holz und Kohle, hin zu Gas und Flüssigbrennstoffen). Im Bereich der Großfeuerungsanlagen werden schon heute effektive Staubabscheider, Entschwefelungsanlagen und Katalysatoren zur Stickstoffoxidminderung eingesetzt.

Heutige Staubabscheider wie Gewebefilter (abreinigbare Oberflächenfilter), Elektrofilter und Hochleistungsnassabscheider sind Aggregate, die den Gesamtstaub und gleichzeitig die Feinstäube wirkungsvoll mindern. Zwar passieren überwiegend nur noch kleine Partikel den Abscheider, dennoch wird deren Anteil aber um 99 Prozent gegenüber dem Rohgas reduziert.

Die Wirksamkeit solcher Staubabscheider für Feinstaub  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  und  $PM_1$  wurde in einem aufwändigen Messprogramm des Bundes und der Länder an stationären Industrieanlagen untersucht. Danach weisen Staubabscheider üblicherweise Abscheidewirkungsgrade für den Gesamtstaub von über 99,8 Prozent auf. Das heißt, im Reingas hinter dem Abscheider liegt die Staubkonzentration zwischen 0,1 bis 30 mg/m<sup>3</sup>, meist unter 10 mg/m<sup>3</sup> während sie vor dem Abscheider im Grammbereich lag. Dabei werden auch die  $PM_{10}$ -Feinstäube durch moderne Abscheider zu mehr als 99 Prozent gebunden. Für  $PM_{2,5}$  und  $PM_1$  gilt in etwa die gleiche Aussage.

Die wirksamste Maßnahme zur Feinstaubminderung ist deshalb der Betrieb von Abscheidern. Bei genehmigungsbedürftigen Anlagen kann man davon ausgehen, dass wirksame Abscheider eingesetzt werden, um die gesetzlichen Anforderungen einzuhalten.

Im Bereich der Raumluftechnik, der Prozesslufttechnik bei Kri-  
maanlagen in Gebäuden und Verkehrsmitteln sowie überall dort, wo „reinste Räume“ gefordert werden, also z. B. der Pharmazie, Lebensmittelindustrie, Raumfahrt, Mikrobiologie und Mikroelektronik werden statt Oberflächenfiltern sogenannte Tiefenfilter eingesetzt.

Je nach Abscheideleistung werden diese als Feinstaub-, Schwebstoff- oder Hochleistungs-Schwebstofffilter bezeichnet. Mit letztgenannten können Partikel bis 0,001 µm abgeschieden und der Staubgehalt auf bis zu 0,01 mg/m<sup>3</sup> gesenkt werden. Zur Reinigung starkstaubhaltiger Industrieabgase sind solche Filter allerdings nicht geeignet.

### ZUSAMMENFASSUNG

Die Luft in den Städten enthält heute viel weniger Staub als noch vor zehn oder zwanzig Jahren. Das gilt auch für Industriegebiete. Grund dafür sind moderne Filter- und Abscheideanlagen, auch neue, weniger staubende Technologien. Doch es bleibt einiges zu tun. Neue Messmethoden erlauben heute die exakte Ermittlung der Belastung mit feinsten Stäuben und deren gefährlichen Inhaltsstoffen. Wirkungsbezogene Untersuchungen haben gezeigt, dass auch vergleichsweise niedrige Belastungen mit feinsten Stäuben zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen können. Der Gesetzgeber hat deshalb die Konzentration an Feinstaub in der Umgebungsluft strikt begrenzt. Zur Zeit können diese Grenzwerte in verkehrsnahen Bereichen und besonders in Städten nicht sicher eingehalten werden. Prognosen über die Entwicklung der Immissionsbelastung aufgrund bereits ergriffener Maßnahmen lassen vermuten, dass besonders die ab 2010 geplante nochmalige Verschärfung des Jahresmittelwertes von 40 µg pro Kubikmeter auf 20 µg zusätzliche Maßnahmen erfordern wird.

Bestimmte Quellen wie z. B. natürliche Quellen entziehen sich den Minderungsanstrengungen. Deshalb muss der vom Menschen verursachte Anteil weiter reduziert werden, bis zumindest die Grenzwerte sicher eingehalten werden.

Im Falle fortgesetzter Grenzwertüberschreitungen sind für bestimmte Gebiete Luftreinhalte- und Aktionspläne aufzustellen. Diese Pläne können Maßnahmen wie befristete Fahrverbote, Zufahrtsbeschränkungen, City-Maut und Innenstadt-Sperrungen sein, die jeder von uns zukünftig zu spüren bekommen könnte.

Das Europäische Parlament und der Rat haben 2002 mit dem 6. Umweltaktionsprogramm als Ziel formuliert: „Erreichung einer Luftqualität, die keine erheblichen negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt hat und keine entsprechenden Gefahren verursacht.“ Im Hinblick auf den grenzüberschreitenden Ferntransport von Partikel und von Vorläuferstoffen wie Schwefeldioxid und Ammoniak werden internationale Vereinbarungen

gebraucht. Deutschland unterstützt alle Bestrebungen zur Aufnahme von Feinstaub (PM<sub>10</sub>) in internationale Vereinbarungen.

Ein Hauptemittent ist der Verkehr. Der Einbau von Rußfiltern in Dieselfahrzeugen ist ein Gebot der Stunde. Manche Automobilhersteller gehen hier schon mit gutem Beispiel voran. Die Autoindustrie hat die Ausrüstung neuer Diesel-PKW bis 2008 zugesagt. Durch den Einsatz von Rußfiltern bei Dieselfahrzeugen kann eine Abscheiderate von über 99% sichergestellt werden. Bereits beschlossene PKW-Abgasnormen (EURO-Normen III bis IV) haben zu einer Reduzierung der direkten und indirekten Feinstaubemissionen geführt. Zusätzliche Verschärfungen der Grenzwerte für PKW, leichte und schwere Nutzfahrzeuge sowie eine Fortentwicklung der europäischen Abgasnormen (EURO V) sind als Teil des „Clean Air for Europe (CAFE)“-Programmes der europäischen Kommission geplant. Schwierig ist die Situation bei den verkehrsbedingten Emissionen durch Abrieb von Bremsen, Kupplung, Reifen und Fahrbahn sowie durch (Wieder-)Aufwirbelung. Diskutiert wird derzeit die Wirksamkeit zusätzlicher Straßenreinigungsprogramme an Belastungsschwerpunkten.

Eine weitere wesentliche Quelle für Feinstaubemissionen sind Produktions- und Verbrennungsprozesse. Bei dem größten Teil dieser Prozesse werden bereits heute hochwirksame Filter eingesetzt. Wie gezeigt wurde, ist keine wesentliche weitere Verbesserung der Situation hinsichtlich der Primärpartikel zu erwarten. Lediglich durch zusätzliche Verminderung von Stickstoffoxiden als sogenannter Vorläuferstoff zur Partikelbildung, kann eine weitere Verminderung der Feinstaubemissionen erreicht werden.

Ein Teil der vom Menschen verursachten Feinstäube emittiert allerdings diffus. Bei diesen Quellen wird man in Zukunft mit weiteren Maßnahmen ansetzen. Dafür wurden 2002 zusätzliche spezielle Konkretisierungen in das wichtigste Industrieanlagenregelwerk, die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft), aufgenommen.

Besonders im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher kann eine Minderung der direkten Staubemissionen durch primäre Maßnahmen, dazu gehören vor allem Energiesparmaßnahmen und Brennstoffumstellung, erreicht werden. Hier ist auf die Novellierungsaktivitäten zur Kleinf Feuerungsanlagenverordnung hinzuweisen.

Die Erfolge, die in Deutschland und in anderen Ländern Europas, in Nordamerika und Japan in Sachen Staubreduktion erzielt wurden,

sollten jedoch nicht vergessen machen, dass die weitaus meisten Menschen an vielen Plätzen dieser Erde immer noch eine Luft einatmen, die mit Staubpartikel aller Art geradezu gesättigt ist.

#### ANMERKUNG

1) Abbildung 1 und 2 wurden mit freundlicher Genehmigung des Autors Herrn Dr. H.F. Krug vom Forschungszentrum Karlsruhe entnommen aus: Krug, Harald F., Katrin Kern und Silvia Diabeté: Toxikologische Aspekte der Nanotechnologie. Versuch einer Abwägung. Technikfolgenabschätzung. Theorie und Praxis, 13 (2), 2004, S. 58-64.

#### LITERATUR

1. TOCHTERRICHTLINIE 1999/30/EG vom 22.4.1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel (wie Ruß einschließlich Feinstäube mit einem Durchmesser bis 10 Mikrometer) und Blei in der Luft).

CLEAN Air for Europe: Stefan Jacobi; European Commission, DG Environment. (<http://secus.met.fu-berlin.de/veranstaltungen/Abstracts%20PM10/Jacobi.htm>).

DATEN zur Umwelt – Der Zustand der Umwelt in Deutschland. Berlin 2001.

DIN EN 12341, Ausg. 03/1999 – Luftbeschaffenheit; Ermittlung der PM 10-Fraktion von Schwebstaub.

DOCKERY, Douglas W. et al.: Epidemiologic evidence of cardiovascular effects of particulate air pollution. Environmental health perspectives, 109, 2001, S. 483-486.

INFORMATIONSAUSTAUSCH im Rahmen der Richtlinie zur integrierten Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie): BVT Merkblätter unter: (<http://eippcb.jrc.es/pages/Fmembers.htm>).

LAHL, Uwe und Wilhelm Steven: Reduzierung von Partikelemissionen – eine gesundheitliche Schwerpunktaufgabe. Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft. Düsseldorf 2004.

MCNEILL, John: Blue Planet. Die Geschichte der Umwelt im 20. Jahrhundert. Frankfurt am Main 2003 (insb. Kap. 3 und 4).

MEYERS Konversationslexikon, 3. Auflage 1874, Bd. 2, Artikel Atmosphäre.

MULTIKOMPONENTENPROTOKOLL (Mai 2003): ([www.bmu.de/de/1024/js/download/b\\_multikomponentenprotokoll](http://www.bmu.de/de/1024/js/download/b_multikomponentenprotokoll)).

REMUS, Rainer: Feinstaub-Entstehung und Quellen der Feinstaub-



- emissionen. Neue gesetzliche Regelungen. Lengdorf: UB MEDIA Fachdatenbank Emissionsschutzrecht und Luftreinhaltung 2000. Richtlinie 1999/30/EG des Rates vom 22. April 1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft (1. Tochterrichtlinie) (Abl. EG, L163 S. 41-60).
- STELLUNGNAHMEN der Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN (KRdL) zu Feinstaub und Stickstoffdioxid (Juli 2003) ([http://www.bmu.de/de/800/js/download/b\\_stellungnahmen\\_krdl/](http://www.bmu.de/de/800/js/download/b_stellungnahmen_krdl/)).
- STRUSCHKA, Michael, Volker Weiss und Günter Baumbach: Feinstaub-Emissionsfaktoren bei kleinen und mittleren Feuerungsanlagen. Immissionsschutz. Berlin 2004.
- TÜV Süddeutschland: Validierungsmessungen für Feinstaub (PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub>) an diffusen Quellen bei Anlagen der Metallerzeugung im Hinblick auf die EU-Luftqualitätsrahmenrichtlinie. Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes. September 2002 (UFOPLAN Nr.: 200 44 316).
- UMEG: Schwebstaubbelaugung in Baden-Württemberg. Herausgeber: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Mai 1998.
- Umweltbundesamt: Jahresbericht 1999 (Staub – die unterschätzte Gefahr). Berlin 1999, S. 50- 56.
- Umweltbundesamt (WaBoLu 2/2000): Feinstaub – Die Situation in Deutschland nach der EU-Tochter-Richtlinie. Bericht über ein Symposium Juni 2000.
- VDI 3790 Blatt 1: 1999-05 Umweltmeteorologie; Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen – Lagerung, Umschlag und Transport. Berlin 1999.
- VDI 3677 Blatt 1: 1997-07 Filternde Abscheider – Oberflächenfilter. Berlin 1997.
- VDI 3677 Blatt 2: 2004-02 Filternde Abscheider – Tiefenfilter aus Fasern. Berlin 2004.
- WICHMANN, H. Erich: Sources and Elemental Composition of Ambient Particles in Erfurt, Germany. Landsberg am Lech 2002.
- World Health Organisation: Air Quality Guidelines for Europe. WHO Europe, Copenhagen 1987 ([www.euro.who.int/air](http://www.euro.who.int/air)).
- World Health Organisation: Update and Revision of the WHO Air Quality Guidelines for Europe. ICP EHH 018 VD96.2/11. 1997.
- World Health Organisation: Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide. Report on a WHG Working Group, Bonn 2003 ([www.euro.who.int/document/e79097.pdf](http://www.euro.who.int/document/e79097.pdf)).

ARMIN RELLER

## KLEINE TEILE – GROSSE WIRKUNG?

### ÜBER CHANCEN UND RISIKEN VON FUNKTIONSTÄUBEN UND NANOSKALIGEN MATERIALIEN

Er ist vielfältig und allgegenwärtig, und doch gibt es kein Synonym für den Staub. Auch steht fest, dass er aus festen Teilen besteht: im Straßenstaub sind es die unwägbaren, bedrohlichen, im Blütenstaub die der Blütenart entsprechenden, das Fortbestehen der Pflanzen vermittelnden Teile. Er ist überall anzutreffen, in immer wieder veränderter Zusammensetzung und Form. Fasern, Körner, Partikel, Kristallite, Pollen verraten etwas von seinem Charakter und von seinen Eigenschaften. Wenn wir wissen, woher er kommt, wo und was seine Quellen sind, die ihn bzw. seine Konstituenten in einer spezifischen Form zusammengefügt geprägt haben, ja, dann lässt er sich erkennen, dann gibt er zumindest einen Teil seiner Geschichte preis. Dass er einmal am Ort bleibt, ein andermal lange Reisen unternimmt, als Überraschung an unwegsamsten Stellen anzutreffen ist, kontrollierte Stoffumwandlungen stört, macht ihn unbeliebt, meist lästig und in der Regel widerspenstig. Er wird gefangen mit dem Staubfänger, dem Staublappen und dem Staubsauger. Ganze Industriezweige leben von seiner Festsetzung auf Filtern, in Gaswäschereien und an Klebern. Wir Menschen gewinnen ihm kaum positive Eigenschaften ab, er ist – gerade jetzt in der Diskussion der Feinstaub-Thematik – eine Bedrohung und ein Politikum.

Kellerasseln oder Ameisen sehen diese staubigen Geschichten sicher ganz anders: Für sie muss Staub eine Wundertüte sein, zusammengesetzt aus Eßbarem, Speicherbarem oder anderweitig Verwertbarem. Und jede Wollmaus, jede Staubwolke und jedes Staubkorn birgt neue Überraschungen. Könnte es sein, dass Staub durchaus wichtige Funktionen in der Biosphäre dieses Planeten erfüllt? Gewiß, wenn

man bedenkt, wie viele staubförmige, lebenswichtige Stofffragmente und Stoffportionen für Fortpflanzungs-, Wachstums- und Umverteilungsprozesse ständig umlaufen, angetrieben durch den Wind als wichtigsten, unerläßlichen Transporteur.

Obwohl Staub ubiquitär und unfäßbar vielfältig, lästig und dennoch lebenswichtig auftritt, gibt es keine Staubwissenschaften. Und obwohl sich die Naturwissenschaften mehr und mehr mit den kleinsten Stoffeinheiten, den mikroskopischen und nanoskopischen Fraktionen und Fragmenten der uns bekannten stofflichen Realitäten befassen, gibt es über die Erscheinungsformen, die chemische Zusammensetzung und das Reaktionsverhalten kaum einschlägige Literatur. Meine Vermutung ist, dass sich der Staub kraft seiner nicht zu quantifizierenden Eigenschaften – individuelle Entstehungsgeschichten und Trajektorien prägen seine jeweilige Erscheinungsformen – einer umfassenden naturwissenschaftlichen, insbesondere physikalischen und chemischen Analyse entzieht. Dementsprechend lässt er sich auch nicht gezielt und reproduzierbar synthetisieren, entzieht sich auf diese Weise einer Inbesitznahme durch die Chemie. Umgekehrt ist er gerade dank seines individuellen, prozesshaften Charakters ein Informationsträger, der sich über seine Herkunft und seine Eigenschaften zumindest fragmentarisch befragen lässt, sehr oft jedoch Teile seiner Geschichte verschleiert.

### **NANO – EINE NEUE PROVINZ IM STAUBREICH**

Nun hat sich aber die Situation insofern verändert, als die Nanowissenschaften und die Nanotechnologie auf den Plan getreten sind. Eigentlich bedeutet der Begriff Nanowissenschaften nur, dass Manipulationen an Materialien in atomaren, molekularen und makromolekularen Dimensionen vorgenommen werden, wobei deren Eigenschaften von denjenigen räumlich ausgedehnter Materialien differieren. Nanotechnologie wäre folglich das Design, die Charakterisierung sowie die Funktionalisierung und Nutzung von Stoffen durch die Kontrolle ihrer nanoskopischen Strukturen und Erscheinungsformen (Morphologie). In den kleinsten Welten lassen sich Eigenschaften und Effekte beobachten, die man aus den mikro- und makroskopischen nicht kennt.

Episoden aus der Geschichte der Entdeckung und wissenschaftlichen Interpretation von Phänomenen im mikroskopischen und nanoskopischen Raum sollen als erste Wegmarken einer Kartographie

des *nano*-Neulands – so zu sagen einer neu zu erschließenden Provinz des Staubreichs – dienen: Der 1623 geborene Antony van Leeuwenhoek, niederländischer Kaufmann und später Optiker und Mikroskopiker entwickelt einfache Lupen und Mikroskope. Mit deren selbst geschliffenen Linsen – van Leeuwenhoek war Autodidakt – erreichte er bis zu 270-fache Vergrößerungen und konnte so erste Bilder von der Mikrowelt gewinnen.

Die in der Folge rasch aufblühende Mikroskopiekunst erlaubte zahlreiche verblüffende und erhellende Einblicke in die Erscheinungsformen kleinster organischer und stofflicher Strukturen. Der vom Alchimisten Johann Rudolf Glauber 1659 entdeckte und nach dem niederländischen Iatrochemiker Andreas Cassius benannte Goldpurpur wird zum analytischen Nachweis von Gold genutzt. Wenig später gelingt es dem Alchimist und begnadeten Glasmacher Johann Kunckel, pulverförmigen Goldpurpur in Glas einzubringen und das berühmte Rubinglas herzustellen. Erst viel später wurde diese ungewöhnliche Erscheinungsform von Gold – so genanntes kolloidales Gold – durch Michael Faraday, dem herausragenden englischen Naturwissenschaftler und Naturbeobachter, entsprechend dem Stand des damaligen Wissens interpretiert. Seine Vermutung war, dass die ungewöhnliche Farbe des Metalls von seiner räumlichen Anordnung, seiner feinst verteilten Form herrühre. Eine geniale Folgerung: Heute wissen wir, dass in der Tat sehr kleine Metallpartikel ihre charakteristischen Eigenschaften wie den metallischen Glanz bzw. die goldene Farbe, aber auch die elektrische Leitfähigkeit verlieren, die Eigenschaften sich demnach bei gleich bleibender stofflicher Zusammensetzung in nanoskaliger Erscheinungsform prägnant verändern.

In den neunziger Jahren des 20. Jahrhunderts studiert und interpretiert eine Forschergruppe um den Biologen Wilhelm Barthlott das Phänomen, dass auf Blattoberflächen bestimmter Pflanzen, wie zum Beispiel Lotus, Wassertropfen abperlen, aber auch Staubteilchen eine minimale Haftung aufweisen und leicht weggespült werden können. Die Blätter sind also gewissermaßen selbst reinigend. Mikroskopische Untersuchungen offenbarten eine durch nanoskopische, senkrecht zur Oberfläche stehende „Lanzen“ geprägte Oberfläche mit entsprechend kleinen Kontaktflächen für Wechselwirkungen mit Fremdteilchen. Dieser so genannte Lotus-Effekt war dank seiner Anschaulichkeit Mitauslöser der eingangs genannten Forschungs- und Entwicklungslawine, die aber nur deshalb so gewaltige Ausmaße

annahm, weil schon sehr viele experimentelle Befunde in unterschiedlichsten Forschungszweigen vorlagen, die aber noch nicht mit dem übergreifenden, viel versprechenden Titel Nanowissenschaften bzw. Nanotechnologie bezeichnet wurden.

Die Untersuchung der stofflichen Erscheinungsformen im submikroskopischen Bereich zeigt, dass auch einige schon lange bekannte Partikel durchaus als Nanoteilchen bezeichnet werden können. Manche dieser Partikel werden seit langem technisch hergestellt, wie zum Beispiel der durch Verbrennung gewonnene Ruß, der in der Kautschukindustrie, aber ebenso in der Farbindustrie seit langem unentbehrlich ist. Seit den 1940er Jahren wird darüber hinaus durch spezielle Verbrennungsverfahren feinstpulvrige Kieselsäure, der bisweilen sogenannte „weiße Ruß“ gewonnen, der längst ein sehr breites Anwendungsfeld erobert hat und dessen Partikel ebenfalls nur wenige Nanometer groß sind. Gesundheitlich scheint die nanoskalige Kieselsäure, die mikroskopisch amorph vorliegt, nach den bisher vorliegenden Ergebnissen keine außergewöhnliche Gefährdung darzustellen. Auch für Prozesse der synthetischen Chemie wurden schon lange Metalle oder Metalloxide als Katalysatoren mit Teilchengrößen in submikroskopischen Abmessungen gezielt hergestellt und eingesetzt.

Die Entdeckung nanoskaliger Effekte beruhte bisher auf der Beobachtungsgabe und dem präparativen und technischen Geschick. Durch die Elektronenmikroskopie in all ihren Varianten als Sensor- und Analysenmethode und durch die Errungenschaften modernster chemischer und physikalischer Manipulatoren wird eine gezielte, sich schnell entwickelnde und breit gefächerte Nutzung von Nanomaterialien erwartet.

### **DAS NEUE IM KLEINEN**

Welche Besonderheiten weisen kleinste Stoffeinheiten auf? Je kleiner Stoffportionen sind, desto mehr Atome oder Atomgruppen sind an deren Oberfläche zu finden. Eigenschaften wie elektrische Leitfähigkeit oder Magnetismus können von bestimmten Größenverhältnissen an unstetige Änderungen erfahren. Umgekehrt lassen sich wie im Fall des Goldpurpurs ungewöhnliche Effekte durch die Kontrolle der Teilchengröße und Teilchenform gezielt einstellen. Auch die gegenwärtig bekannten Modifikationen von Kohlenstoff – Graphit, Diamant, Fullerene und Kohlenstoffnanoröhren – prägen in ihren nano-

skopischen Erscheinungsformen sehr unterschiedliche physikalische und chemische Eigenschaften aus, obwohl sie immer aus denselben Bausteinen (Kohlenstoffatomen) aufgebaut sind. Hierin liegt die Faszination der Form-Eigenschaften-Beziehungen kleinster Stoffportionen. Aus chemischer Sicht sind ihre Oberflächenatome und -gruppen aktive Zentren für mögliche Wechselwirkungen mit der nächsten Umgebung, z. B. technischen Substraten oder biologischen Systemen. Dank ihrer minimalen Abmessungen sind viele Nanopartikel offensichtlich sehr mobil, sie lassen sich in vielen Fällen über flüchtige und flüssige Medien weiträumig verfrachten, wie es für den Autoabgaskatalysator Platin beobachtet wird. Während ihrer Herstellung und Nutzung gilt es daher Vorkehrungen zu treffen, die eine unkontrollierte Beweglichkeit verhindern.

Durch ihre räumliche Anordnungen, ihre äußeren „Kontaktstellen“ bzw. chemisch aktiven Zentren können Nano-, aber auch Staubpartikel mit ihrer jeweiligen Umgebung kommunizieren, etwa als Katalysatoren oder als Wachstumsprozesse oder Metabolismen steuernde Einheiten. Aus medizinischer und epidemiologischer Sicht werden deshalb Vorbehalte gegenüber dem praktischen Einsatz von Nanopartikeln geäußert: Da biologische Prozesse wie Transportvorgänge durch Zellmembranen, enzymatische Reaktionen, u.a. in nanoskopischen räumlichen Kompartimenten vonstatten gehen, sind Wechselwirkungen mit entsprechend kleinen, mobilen Stoffeinheiten möglich. So ist schon bekannt, dass die oben genannten Fullerene je nach der Beschaffenheit, d. h. mit funktionellen Gruppen versehenen Oberflächen, sehr unterschiedliche Transporteigenschaften und davon abhängig mehr oder weniger leicht in biologische Systeme eindringen und toxische Wirkungen entfalten. Diese Befunde bestätigen, dass der jeweiligen äußeren Erscheinungsform eine eminente Bedeutung zukommt: Wie aus der Geschichte der Asbestnutzung oder der Problematik der Aerosole bekannt ist, sind viele technisch wichtigen Materialien an sich nicht bedenklich, durch ihre Größe oder ihre Wirkform – beim Asbest lanzenförmige Kristallite, die mit Leichtigkeit Zellwände penetrieren – können sie jedoch erhebliche Gesundheitsrisiken darstellen. Ein Thema, das auch Versicherungsunternehmen zentral betrifft.

Kann die Nanotechnologie nutzbringend, mit minimalen Risiken und wirtschaftlich wettbewerbsfähig eingesetzt werden? Die Vorstellung, mit kleinsten Stoffmengen wichtige praktische Funktionen in

Medizin und Technik verlässlich zu erfüllen, ist aus ökologischer und ökonomischer Sicht sehr attraktiv. Nur gilt es zu beachten, dass der Aufwand zur reproduzierbaren Herstellung größerer Mengen von Nanomaterialien nicht zu unterschätzen ist. Solange diese Nanomaterialien immobilisiert sind, d. h. für ihre Funktion in wohl definierten Funktionsräumen eingesetzt werden, sind keine unmittelbaren Gefährdungspotentiale zu erwarten. Dies ist im Fall der Nutzung physikalischer Eigenschaften meist gegeben, indem die Funktionsmaterialien in so genannten Devices, d. h. aus verschiedenen Materialien zusammengesetzte Funktionseinheiten wie z. B. ein Chip, eine Leuchtdiode etc., integriert sind. Für chemisch und biologisch aktive, insbesondere als pharmazeutische oder kosmetische Produkte eingesetzte Wirkformen stellt sich die Frage, ob sie sich während ihres gesamten Lebenszyklus in den für sie vorgesehenen Kompartimenten bewegen oder aber Räume erreichen, in denen sie ganz andere, möglicherweise unvorhergesehene und unerwünschte Funktionen erfüllen. Der Gesetzgeber benötigt klare Kriterien für die Bewilligung und gegebenenfalls Einschränkung der Nutzung dieser Produkte. Hierfür wird eine Klassifizierung und Standardisierung der schwierig zu quantifizierenden Kenngrößen Form und Funktion von Nanomaterialien notwendig. Wie es vor gut hundert Jahren bei der Erschließung der mikroskopischen Lebenswelten durch die Aufklärung und wundervolle Dokumentation der Formen und Funktionen von Kalkskeletten kleinster Lebewesen durch Christian G. Ehrenberg und vor allem Ernst Haeckel geschah, stehen wir heute in der Verantwortung, die nanoskopischen Erscheinungsformen zu dokumentieren, anhand ihrer Entstehungsweise und ihrer zugewiesenen, aber auch potentiellen Wirk- und Funktionsformen zu klassifizieren und dann über deren nutzbringende Anwendung zu entscheiden, also Stoff-Lebenszyklen bzw. Stoffgeschichten verantwortungsvoll zu gestalten. Da Staub an den Wegkreuzungen von Stoffgeschichten und Produktionsprozessen entsteht oder übrig bleibt, wirkt er dank seiner spezifischen Erscheinungsformen und Verhaltensweisen als wichtiger Lehrmeister für die Entwicklung einer Phänomenologie des Stofflichen.

## LITERATUR

- BÖSCHEN, Stefan, Jens SOENTGEN und Armin RELLER: Stoffgeschichten – Eine neue Perspektive für transdisziplinäre Umweltforschung. In: GAIA 13, 2004, S. 19-25.
- EIDEN, Stefanie: Kolloide: alte Materialien, neue Anwendungen. In: Nachr. Chem. 52, 2004, S. 1035-1038.
- GLOEDE, Wolfgang: Vom Lesestein zum Elektronenmikroskop Berlin 1986.
- HAECKEL, Ernst: Kunstformen der Natur. München / New York 1998.
- HETT, Annabelle: Nanotechnologie: Kleine Teile – große Zukunft? Schweizerische Rückversicherungs-Gesellschaft, Zürich 2004.
- KRUG, Harald F.: Nanopartikel: Gesundheitsrisiko, Therapiechance? In: Nachr. Chem. 51, 2003, S. 1241-1246.
- LÄRMER, Karl: Johann Kunckel, der Alchimist von der Pfaueninsel. In: Berlinische Monatsschrift 8, 2000, S. 10–16.
- NANOSCIENCE and NANOTECHNOLOGIES: Opportunities and Uncertainties. In: The Royal Society & The Royal Academy of Engineering. London 2004.
- PRIESNER, Claus und Karin FIGALA: Alchemie: Lexikon einer hermetischen Wissenschaft. Hrsg. von Claus Priesner und Karin Figala. München 1998, S. 377.
- RELLER, Armin: Chemie im Kontext: Skizze einer Geographie der Ressourcen. In: politische oekologie 86, 2003, S. 22-25.
- TECHNIKFOLGENABSCHÄTZUNG – Theorie und Praxis. Schwerpunktthema: Große Aufmerksamkeit für kleine Welten – Nanotechnologie und ihre Folgen. ITAS, Karlsruhe 2, 2004, S. 1–85.



ANNETTE PETERS

## KRANK DURCH FEINSTAUB?

### AUSWIRKUNGEN DER LUFTVERSCHMUTZUNG AUF DIE GESUNDHEIT

Sie sind so klein, dass man sie mit dem bloßen Auge nicht sieht, so leicht, dass sie durch die Luft schweben und doch gefährlich: Winzige Staubpartikel bringen das Herz aus dem Takt. Sie stammen aus Abgasen von Autos und Fabriken, entstehen durch Abrieb von Autoreifen und Straßenbelag oder werden im Winter zusätzlich durch Heizungen produziert. Zwar haben bessere Filteranlagen und Verbrennungsprozesse dazu geführt, dass die Belastung durch grobe und feine Teilchen deutlich abgenommen hat, doch gerade die Kleinsten könnten die Gefährlichsten sein. Eine Möglichkeit, diese Vermutung wissenschaftlich zu belegen, ist die Epidemiologie. Dabei geht es um die statistische Korrelation von bestimmten Umweltparametern einerseits, in diesem Fall den Partikelkonzentrationen in der Außenluft, und Krankheits- oder Todesfällen andererseits. Die Epidemiologie hat den Vorteil, dass sie von der konkreten Lebenssituation ausgeht – und den Nachteil, dass man die Konzentrationen und Lebensbedingungen nicht kontrollieren kann.

Zu welchen Ergebnissen ist nun die Epidemiologie in Bezug auf den Feinstaub gelangt? Studien haben gezeigt, dass ein Zusammenhang zwischen der Höhe der gemessenen Luftschadstoffe und nachteiligen Auswirkungen auf die Gesundheit besteht. Dies gilt sowohl für die unterschiedlichen gasförmigen Schadstoffe wie Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ), Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) und Ozon ( $\text{O}_3$ ) als auch für die partikelförmigen Bestandteile (Schwebstaub), für welche die meisten epidemiologischen Untersuchungen vorliegen. Eine zentrale Rolle wird inzwischen den partikelförmigen Schadstoffen zugeschrieben. Diese werden als Masse in Abhängigkeit von der Partikelgröße ( $\text{PM}_{10}$  oder  $\text{PM}_{2,5}$ : Partikel mit einem mittleren Durchmesser von  $10\mu\text{m}$

bzw.  $2.5\mu\text{m}$ ) gemessen. Für die ultrafeinen Partikel, die kleiner als  $0,1\mu\text{m}$  sind, und die auch Nanopartikel genannt werden, da sie von der Größe bereits im Nano-Bereich liegen, wird die Partikelanzahlkonzentration angegeben (Cyrus et al. 2002).

Bei einem Anstieg der Partikelmasse um  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$   $\text{PM}_{10}$  zeigte sich ein Anstieg der Sterblichkeitsrate um 0,6 Prozent in Europa (Katsouyanni et al. 2001). Es wurde eine lineare Dosis-Wirkungs-Funktion für  $\text{PM}_{10}$  nachgewiesen, ohne dass ein unterer Schwellenwert festgelegt werden konnte. Zusätzlich gibt es Hinweise, dass erhöhte Konzentrationen ultrafeiner Partikel, die überwiegend durch den Verkehr im städtischen Umfeld stammen, zu einem Anstieg der Mortalität führen können. Als Hauptursachen für die erhöhte Mortalität sind dabei Herz-Kreislauf-Erkrankungen (z. B. Herzinfarkt) und Lungenerkrankungen (z. B. Asthma, Lungenentzündung, chronisch-obstruktive Lungenerkrankungen) zu nennen (Peters et al. 2002). Die erhöhte Sterblichkeit stellt dabei das extreme Ausmaß möglicher Folgeschäden dar. Wesentlich häufiger sind schwächer ausgeprägte Effekte, wie eine erhöhte Zahl von Krankenhausaufnahmen, Verschlimmerung bestehender Erkrankungen von Herz und Lunge und Verschlechterung der Lungenfunktion sowie Änderung verschiedener meßbarer Laborparameter ohne direkt erkennbare gesundheitliche Konsequenzen (Abb. 1).

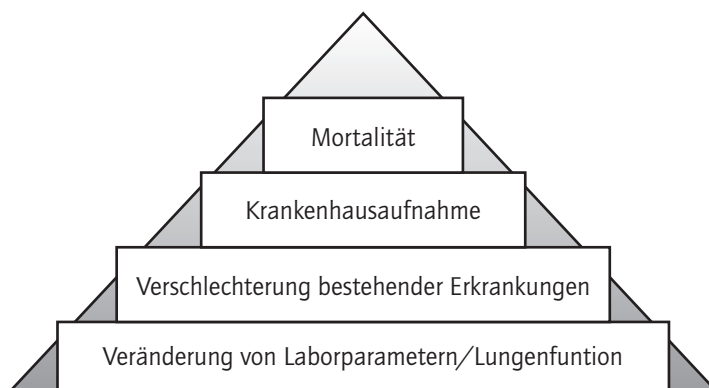


Abb. 1: Gesundheitliche Auswirkungen von Partikel-Luftverschmutzung.

In Mittel- und Osteuropa durchgeführte Studien haben gezeigt, dass erhöhte  $\text{SO}_2$ - und Partikel-Konzentrationen in den 1980ern mit einer Zunahme von Bronchitis bei Schulkindern verbunden war, wäh-

rend ein Effekt auf die Häufigkeit der Asthmaerkrankung nicht nachweisbar war (Heinrich et al. 2002). Mit der Verbesserung der Luftqualität in den 1990er Jahren war diese Erkrankung rückläufig. Allerdings ließ sich in den letzten Jahren ein Anstieg von Allergiesymptomen und Asthma beobachten, der auf die Zunahme des Straßenverkehrs mit der damit einhergehenden Zunahme von NO<sub>2</sub> und feinen Partikeln zurückgeführt wird.

Epidemiologische Studien haben zudem belegt, dass Krankenhausaufnahmen für Herz-Kreislauf-Erkrankungen an Tagen mit hoher Luftverschmutzung häufiger sind. Bei den Erkrankungen handelt es sich vor allem um ischämische Herzerkrankungen (Angina pectoris und Myokardinfarkt), Herzinsuffizienz und Herzrhythmusstörungen. Im Zusammenhang mit Luftverschmutzung erhöhen bestehende Erkrankungen das Mortalitätsrisiko. Eine Vorverlegung des Todeszeitpunktes um wenige Tage kann allerdings die erhöhte Mortalität nicht erklären. Vielmehr erhöhen Phasen hoher Luftverschmutzung vorübergehend das individuelle Risiko-profil durch labilere Arterienverkalkung, höhere Bereitschaft zur Gerinnung des Blutes und Neigung zu Herzrhythmusstörungen. Folglich sind von der erhöhten Sterblichkeit vor allem ältere und kranke Personen betroffen.

Bei der Erforschung der Auswirkungen der Luftschadstoffe auf das Risikoprofil der Bevölkerung haben Studien im Rahmen der „Kooperativen Gesundheitsforschung in der Region Augsburg“ (KORA) eine zentrale Rolle gespielt, da während der Smogepisode 1985 belegt werden konnte, dass die Plasmaviskosität im Blut, der Blutdruck und der Herzschlag ansteigen. Die Resultate der epidemiologischen Studien werden durch experimentelle Untersuchungsergebnisse unterstützt. So ermöglichen Tierversuche, herauszufinden, wo sich Partikel gerade befinden und mit welchen Zellen sie reagieren.

Es zeichnet sich ab, dass ultrafeine Partikel auf mindestens drei verschiedene Weisen den Organismus schädigen können: Sie können das Lungengewebe entzünden, das vegetative Nervensystem beeinflussen oder direkt auf lebenswichtige Organe oder Blutbestandteile einwirken. Denn mit der Atemluft gelangen die Partikel bis tief in die Lunge. Sie sind mit ihren weniger als hundert Nanometern zu klein, um von natürlichen Barrieren wie der Nasenschleimhaut vollständig abgefangen zu werden. Auch die Reinigungszellen der Lungen, die sogenannten Makrophagen, fressen bevorzugt größere Teilchen.

Und durch das dünne Häutchen der Lungebläschen kommen die Partikel auch hindurch: So gelangen sie in die Blutbahn und haben von dort Zugang zu jedem Organ.

Aus den epidemiologischen Studien zum Risiko von Feinstaub ergeben sich umweltpolitische Konsequenzen. So sollten insbesondere Dieselfahrzeuge mit Partikelfiltern ausgerüstet werden, denn Dieselmotoren belasten die Luft mit Partikeln mehr als Benzinmotoren. Diese Filter halten 99,9 Prozent der Staubpartikel jeglicher Größe zurück. Erfreulicherweise soll in Zukunft die Einführung der Filter von staatlicher Seite unterstützt werden.

#### LITERATUR

CYRYS, J., HEINRICH, J., PETERS, A., KREYLING, W. G., WICHMANN, H.-E.: Emissionen, Immission und Messungen feiner und ultrafeiner Partikel. Umweltmed Forsch Prax 7,2002 S. 67-77.

HEINRICH, J., GROTE, V., PETERS, A., WICHMANN, H.-E.: Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub: Epidemiologie der Langzeiteffekte. Umweltmed Forsch Prax 7,2002 S. 91-99.

KATSOUYANNI, K., TOULOUMI, G., SAMOLI, E. et al.: Confounding and Effect Modification in the Short-term Effects of Ambient Particles on Total Mortality: Results from 29 European Cities within the APHEA2 Project. Epidemiology 12,2001, S. 521-31.

PETERS, A., HEINRICH, J., WICHMANN, H.-E.: Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub: Epidemiologie der Kurzzeiteffekte. Umweltmed Forsch Prax 7,2002, S. 101-15.

THOMAS BIERMANN, ANDREAS HELLMANN, ERIK KRUPICKA,  
MICHAEL PÜTZ UND RÜDIGER SCHUMACHER

## STAUBFEINE SPUREN

### IHRE ANALYTIK IN DER KRIMINALTECHNIK

„Kaum eine Berührung ohne Materialübertragung“, so lautet das Locard'sche Prinzip – die wichtigste Grundregel der modernen Kriminaltechnik. Wenn Menschen, Tiere oder Gegenstände miteinander in Kontakt treten, werden stets auch mikroskopisch kleine Partikel, wie beispielsweise Haar- und Faserfragmente, Hautschuppen, unter Umständen auch Lacksplitter oder Materialstäube, ausgetauscht – und zwar in jede Richtung, sowohl z. B. vom Täter zum Opfer, aber auch umgekehrt.

Die Analyse solcher für die Aufklärung von Straftaten relevanter Mikropuren ist eines der zentralen Aufgabengebiete der Abteilung Kriminaltechnik des Bundeskriminalamtes (BKA) in Wiesbaden. Dabei können die rund 280 Mitarbeiter der „KT“ (Kriminaltechnik) in den vielen Laboratorien auf ein breites Arsenal an modernen Analysetechniken zurückgreifen: von spektroskopischen Verfahren mit Infrarot-, Ultraviolett- oder Röntgenstrahlung zur Analyse von organischem und anorganischem Spurenmaterial über vielfältige chromatographische Techniken zum Nachweis auch geringster Mengen Sprengstoff oder Drogen bis hin zu mehreren Elektronenmikroskopen zur Untersuchung kleinster Asservate wie Schmauchpartikel oder Schmelzperlen.

Neben den vielfältigen Möglichkeiten der instrumentellen Analytik können die Kriminaltechniker bei der Untersuchung von Spurenmaterial aber auch die eigenen, im BKA angelegten Referenzsammlungen nutzen. Die zentrale Autolacksammlung umfasst beispielsweise rund 25.000 Lackproben von in Deutschland in Verkehr gebrachten Serien- und Sonderlackierungen und ist damit ein zentrales und oft genutztes Instrumentarium bei der Aufklärung von KFZ-Unfällen – von

vergleichsweise „harmlosen“ Parkplatz-Kollisionen bis hin zu schweren Verkehrsunfällen mit Unfallflucht. Auch die Sammlung von über 1.500 Textilfasern liefert wertvolles Vergleichsmaterial für kriminaltechnische Untersuchungen – gerade in Fällen von Kapitalverbrechen wie Entführung, Vergewaltigung und Mord.

An einigen typischen Beispielen soll im Folgenden gezeigt werden, welches Mikros Spurenmaterial in der Kriminaltechnik von besonderer Bedeutung ist und mit welchen Methoden dieses untersucht werden kann.

### SCHMAUCHPARTIKEL

Beim Abfeuern einer Schusswaffe verlässt nicht nur das Projektil sondern auch eine Wolke von Partikeln die Waffe (Abb. 1). Dieser sogenannte Schmauch, der aus Rückständen des Treibladungspulvers, des Anzündsatzes und Material von Hülse und Projektil besteht, schlägt sich in der Umgebung des Schussabgabeortes, der Hand und Kleidung des Schützen sowie dem Ziel nieder. Von besonderem kriminaltechnischen Interesse sind dabei die Partikel, welche aus dem Anzündsatz einer Patrone stammen. Diese Teilchen weisen eine charakteristische Form (Abb. 2) und chemische Zusammensetzung auf und ermöglichen so eine zuverlässige Unterscheidung von Partikeln anderen Ursprungs.



Abb. 1: Schmauchwolke.

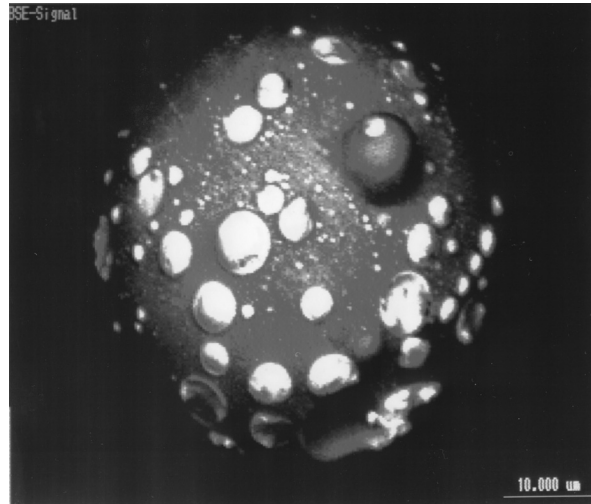


Abb. 2: Schmauchpartikel (REM-Bild).

Gängige Munitionsarten verursachen runde Partikel mit einem typischen Durchmesser von 0,5 bis 20 µm und enthalten typischerweise die chemischen Elemente Blei, Barium und Antimon. Neue Herausforderungen für die „Schussspurenanalyse“ bilden sogenannte schadstoffarme Munitionssorten, die keine schwermetallhaltigen Partikel freisetzen. Solche Munition setzt u.a. die deutsche Polizei ein, um die Gesundheit von Schützen und Schießstandpersonal nicht zu gefährden. Die dabei entstehenden Schmauchpartikel können anhand besonders hoher Titan- und Zinkanteile nachgewiesen werden.

Zum Nachweis von Schmauchpartikeln eignet sich insbesondere ein Rasterelektronenmikroskop (REM) mit energiedispersiver Röntgenmikrobereichsanalytik (EDX), da sich auf diese Weise sowohl die typische Form als auch die chemischen Bestandteile der Schussresiduen nachweisen lassen.

Soll z. B. überprüft werden, ob ein Verdächtiger eine Waffe abgefeuert hat, wird seine Hand mit einem klebrigen Probesteller abgetupft, welcher anschließend im REM untersucht wird. Heute unterstützen moderne, automatisierte Partikelsuchsysteme den Kriminaltechniker. Sie suchen über Nacht aus der Vielzahl von Partikeln auf dem Asservat diejenigen heraus, welche die typischen chemischen Elemente für Schmauch enthalten. Diese vorausgewählten Teilchen werden anschließend von

Technikern überprüft und als Schmauchpartikel bestätigt. Auf diese Weise gelingt ein zuverlässiger Nachweis einzelner Schmauchpartikel.

Neben der eigentlichen Charakterisierung von Schmauch ist auch seine räumliche Verteilung von kriminalistischem Interesse. So kann zum Beispiel die Verteilung des Schmauchs um ein Einschussloch wichtige Informationen zur Schussentfernung liefern. Will man z. B. die Schmauchverteilung eines bleihaltigen Anzündsatzes auf einem Kleidungsstück visualisieren, überträgt man die Schuss Spuren durch Abpressen auf ein mit Essigsäure getränktes Fotopapier und färbt den Schmauch anschließend durch geeignete chemische Reagenzien (z. B. Natriumrhodizonat) an. Das entstandene chemographische Verteilungsbild wird anschließend in eine Reihe von Vergleichsschüssen eingeordnet und erlaubt so eine Abschätzung der Schussentfernung.

So erleichtern nur ca. 20 mg Substanz, die im Zündhütchen einer Patrone enthalten sind, die Aufklärung von Schusswaffendelikten.

#### **FASERN UND HAARE**

Faserspuren sind ein klassisches kriminalistisches Beweismittel, insbesondere bei der Aufklärung von Kapitalverbrechen. In Bekleidungs-, Heim- und Haustextilien sowie in technischen und Automobiltextilien werden heute ca. 30 gebräuchliche Naturfaserarten und circa 4.000 für den jeweiligen Einsatzzweck maßgeschneiderte Chemiefaserarten und -typen verarbeitet. Faserspuren sind Kontakts Spuren. Sie können als Übertragungsspuren bei nahezu allen Deliktgruppen entstehen. In der Mehrzahl liegen Faserspuren dann als Bruchstücke von Einzelfasern vor. Ihre Länge kann wenige Millimeter oder nur Bruchteile davon betragen, ihr Durchmesser im Mittel 0,02 mm und sie wiegen meist weniger als 1 Millionstel Gramm. Sie sind daher mit bloßem Auge weder erkenn- noch lokalisierbar.

Faserspuren werden mittels transparenter Klebebänder von den vermutlichen Spureenträgern wie Bekleidung, Sitzflächen, Haut, etc. abgenommen und durch Aufziehen auf transparente Folienbeutel vor Kontamination und Verlust geschützt. Durch den Transfer in Klebebänder sind Faserspuren der kriminaltechnischen Auswertung überhaupt erst zugänglich. Die Klebebänder müssen unter dem Stereomikroskop bei 10- bis 30-facher Vergrößerung zunächst visuell durchgemustert und die Faserspuren darin lokalisiert werden. Als Suchkriterium steht hierfür nur die Farbe der Fasereinfärbung zur Verfügung.



Auf mikroskopische Objektträger einzeln präpariert werden die Faserspuren dann mit verschiedenen lichtmikroskopischen und spektroskopischen Verfahren zerstörungsfrei klassifiziert und identifiziert. Die dabei routinemäßig zum Einsatz kommenden Verfahren sind äußerst vielfältig und umfassen Methoden wie beispielsweise Polarisations-, Fluoreszenz- und Interferenzmikroskopie aber auch IR-Mikrospektroskopie sowie UV-Mikrospektralphotometrie.

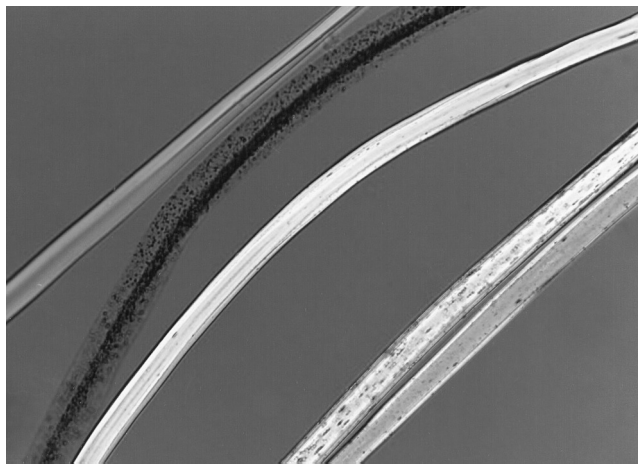


Abb. 3: Synthetische Fasern im Polarisationsmikroskop.

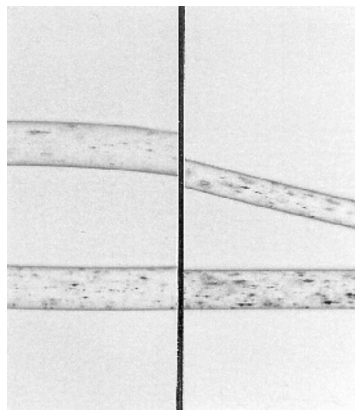


Abb. 4: Faservergleich.

Dabei ist kein Fall wie der andere. Liegen in manchen Fällen nur wenige Faserexemplare zur Analyse vor, kann die Anzahl an Fasern in anderen Fällen in die Tausende gehen. Solch umfangreiche Untersuchungen können leicht Monate, in extremen Fällen Jahre dauern, denn jede einzelne Faser muss im Klebeband lokalisiert und präpariert werden sowie mit den geeigneten analytischen Methoden identifiziert werden.

In der fachbereichseigenen Referenzfasersammlung werden rund 1.500 Faserarten und -typen vorgehalten und dienen der Faserklassifizierung und -identifizierung, der Ausbildung zukünftiger Kriminaltechniker sowie der Evaluierung neu entwickelter Untersuchungsmethoden.

Neben Fasern sind auch Haare ein wichtiges und häufig gefundenes Spurenmaterial – Haare von Menschen, aber auch Tierhaare, die sich am Tatort oder an der Kleidung eines Verdächtigen finden. Seit dem Jahr 2000 kann man sogar ausgefallene (telogene) menschliche Haare mittels einer von BKA-Spezialisten eigens entwickelten DANN-Analysemethode individuell zuordnen. Dieses war bis dahin nur bei intakten, komplett ausgerissenen Haaren möglich.

Durch Vergleich von tierischen Haarspuren mit Haaren aus einer weiteren Referenzsammlung kann man immerhin die Tierart feststellen (Abb. 6), in Ausnahmefällen auch die Rasse. Eine molekulargenetische Methode zur individualisierenden Untersuchung von Hundehaaren – analog zu derjenigen wie sie bei menschlichen Haaren eingesetzt wird – wurde aktuell in die Fallbearbeitung eingeführt.

Haare am Tatort sind daher, auch wenn sie kaum etwas wiegen, als Übertragungs- oder Kontaktsur von einer enormen Aussagekraft. Ein einziges Haar kann ausreichen, um einen Täter zu überführen. Jedes Jahr rollen die BKA-Analytiker rund 200 Verbrechen neu auf, bei denen der Täter der Justiz bislang – um ein Haar – entkommen ist.

### KIESELALGEN

Staubfeine Spuren finden sich nicht nur auf dem Trockenen, sondern auch im wässrigen Milieu: Mikrolebewesen besiedeln jede Pfütze und jeden Teich. Unter den Mikrolebewesen sind vor allem die Diatomeen oder Kieselalgen von Interesse. Hierbei handelt es sich um einzellige Algen, deren Skelett im Wesentlichen aus Siliziumdioxid, also aus einem sehr harten Material besteht. Daher sind diese harten Schalen auch ausgesprochen lange haltbar, ja, man kann sie sogar noch in Millionen Jahre alten mineralischen Ablagerungen finden. Fast alle Arten sind mikroskopisch klein, die kleinsten sind nur wenig größer als 1-2 Mikrometer,

die meisten Süßwasserformen sind zwischen 10 und 100 Mikrometer lang. Besonders große mit bloßem Auge sichtbare Vertreter dieser Spezies findet man in den Meeren, mit Durchmessern von bis zu 2 mm. Sie haben teilweise bizarre, geradezu futuristische Formen. Die Haltbarkeit der Diatomeen und ihre charakteristischen Formen machen sie zu einem wichtigen Indiz für Spurensucher – vor allem natürlich dann, wenn es um Geschehnisse geht, bei denen Wasser eine Rolle spielt.

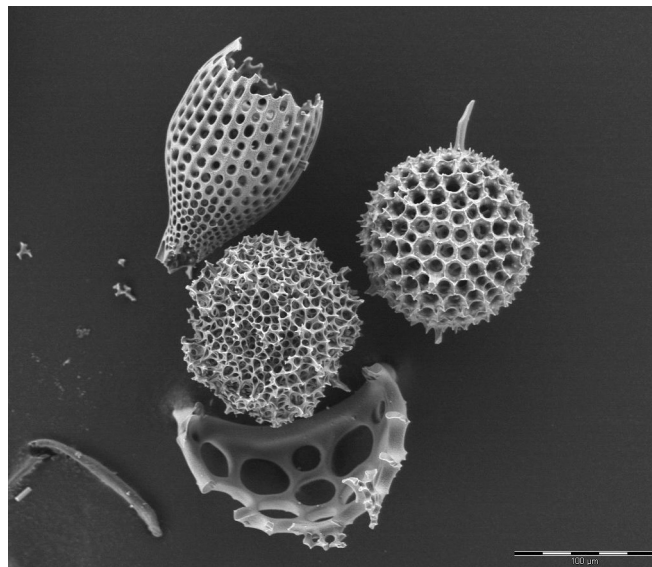


Abb. 5: Elektronenmikroskopische Aufnahme von Diatomeen.

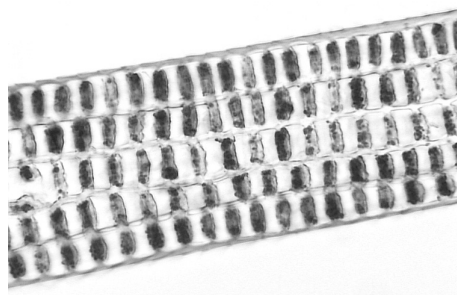


Abb. 6: Haar aus dem Fell eines Kaninchens (der Balken rechts unten entspricht 0.1 mm) (200 fache Vergrößerung).

So können Diatomeen, die sowohl in der Lunge als auch in weiteren Organen von Wasserleichen gefunden werden, ein Indiz dafür sein, dass das Opfer ertrunken ist. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass vereinzelt Kieselalgen, speziell terrestrische (bodenlebende) Arten auch durch die Luft übertragen, eingeatmet und so in der Lunge abgelagert werden können (natürliche Verschleppung). Kieselalgen an der Kleidung eines Verbrechensopfers können Aufschlüsse über den Ort der Tat geben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass verschiedene Gewässer bezüglich der Arten und Häufigkeitsverteilung der in Ihnen lebenden Diatomeen unterschieden werden können. Auch ist es unter Umständen möglich, an aus dem Wasser geborgenen Gegenständen eine grobe (jahreszeitliche) Liegezeitabschätzung vorzunehmen, wenn man Arten nachweisen kann, die nur zu bestimmten Jahreszeiten vermehrt vorkommen.

Auch Pollen, der speziell bei den windbestäubenden Arten dafür gebaut ist lange Strecken in der Luft zurückzulegen, kann in bestimmten Fällen interessant sein, da sich die einzelnen Arten aufgrund mikroskopisch sichtbarer Merkmale gut unterscheiden lassen. Entsprechend der Jahreszeit – und damit verbunden der Blütezeit der Pflanzen – können Verteilungsmuster (Pollenspektren) in der Probe auftreten, die mehr oder weniger die Vegetation eines Gebietes widerspiegeln. Damit kann eine Pollenanalyse unter günstigen Umständen sowohl zur Herkunftsanalyse einer Materials spur herangezogen, als auch zur Ermittlung der Liegezeit eines Gegenstandes genutzt werden.

## DROGEN

Die Detektion von Betäubungsmittels puren spielt bekanntermaßen für den Zoll eine große Rolle bei der Bekämpfung des Rauschgiftschmuggels. In diesem Zusammenhang werden häufig, wie auch bei der Suche nach Sprengstoff oder Brandmitteln, speziell geschulte Hunde eingesetzt.

Auch im BKA werden Asservate auf Spuren und Anhaftungen von Betäubungsmitteln (zumeist Heroin, Cocain, Amfetaminderivate und oder Cannabis) kriminaltechnisch untersucht, allerdings nicht mit Hunden, sondern im Labor mit modernsten instrumentell-analytischen Methoden. Typische Fragestellungen sind beispielsweise, ob ein Autoreifen, ein PKW-Kofferraum oder ein Gepäckstück zum Transport von Rauschgift, oder ob ein sichergestelltes, äußerlich un-

benutzt erscheinendes Behältnis, zur Herstellung synthetischer Drogen (z. B. Ecstasy) verwendet worden ist. Zum Nachweis anhaftender Betäubungsmittelsuren werden vom Untersuchungsobjekt Saugproben an rauen Oberflächen (z. B. Textilbezüge im Inneren eines PKW) mit einem modifizierten Staubsauger oder Wischproben an glatten Glas-, Metall- oder Kunststoffoberflächen genommen. Diese Saug- und Wischproben werden, zum Teil nach chemischer Aufreinigung, mit Ionenmobilitätsspektrometern (IMS) und Massenspektrometern analysiert. Mit einem IMS-Gerät lassen sich Spuren von Drogen oder Sprengstoffen bis zu wenigen Nanogramm nachweisen. Bei der Interpretation der Ergebnisse von Betäubungsmittel-Spurenanalysen ist jedoch Vorsicht geboten.

So zirkulierte 2002 eine Untersuchung des Instituts für Biomedizinische und Pharmazeutische Forschung in Nürnberg, wonach sich auf neun von zehn Euro-Scheinen Cocain nachweisen lasse. Cocainkonsumenten nutzen z.T. gerollte Geldscheine, um die Droge durch die Nase zu schnupfen. Der oftmals unterstellte Zusammenhang zwischen der Cocainkontamination eines Geldscheins und einem Cocainkonsum des Geldschein-Besitzers ist jedoch nicht ohne weiteres herstellbar. Wie neuere Studien britischer Forscher belegen, ist die Hauptursache für Anhaftungen von Cocain und anderen Betäubungsmitteln an Geldscheinen die Übertragung von kontaminiertem Staub in den Geldzählmaschinen der Banken. Auf diese Weise können die an einem einzigen, tatsächlich für den Cocainkonsum „benutzten“ Geldschein anhaftenden Spuren eine große Zahl „sauberer“ Geldscheine kontaminieren. An diesen Geldscheinen mit übertragenen Anhaftungen kann im Labor mit Hilfe der genannten, sehr empfindlichen Spurenanalysemethoden ohne Schwierigkeiten Cocain nachgewiesen werden.

#### LITERATUR

- KAYE, Brian H.: Mit der Wissenschaft auf Verbrecherjagd. Nikol 2004.
- SCHÄFER, Thomas: Chemiker in der Kriminaltechnik. In: Nachrichten aus der Chemie 52, 2004, S. 223-224.
- SEINSCHKE, Dirk: Chemie und Kriminaltechnik. In: Chemie in unserer Zeit 36/5, 2002, S. 284-293.
- VOSS-DE HAAN, Patrick, Horst KATTERWE und Ulrich SIMMROSS: Indizien-suche im Labor. In: Physik Journal 2, 2003, S. 35-41.

LUITGARD MARSCHALL

## DER LETZTE DRECK

### ÜBER HAUSSTAUB UND DAS LEBEN IN DER STAUBWOLKE

Was die deutsche Sprache fast zärtlich als Wollmäuschen hätschelt, entpuppt sich zusehends als Ungetier. Vom gemeinen Hausstaub ist die Rede – seinen vielfältigen Erscheinungsformen und seinen zahlreichen Bewohnern. Bislang als lästiger, doch friedfertiger Störenfried belächelt, gerät er uns mehr und mehr zur Bedrohung. Neue Forschungsergebnisse belegen: Nicht nur die Umwelt draußen, auch die Luft in unseren Wohnungen und Büros ist erheblich mit gefährlichen Stäuben befrachtet. Besonders alarmierend sind die Ergebnisse einer Untersuchung im Auftrag des Bundesgesundheitsamtes in Berlin, die Anfang der 1990er Jahre 3.000 Wohnungen zwischen Flensburg und Garmisch in Augenschein nahm. In den meisten Räumen sei die Luft oft bis zu fünfzigmal giftiger als an vielbefahrenen Straßenkreuzungen in Großstädten. Und da Europäer nun mal zwischen 60 und 90 Prozent ihrer Lebenszeit in Innenräumen verbringen, hat der häusliche Staub einen viel größeren Einfluss auf unsere Gesundheit als schädliche Partikel der Außenluft.

Hausstaubmilben und anderes Spinnengetier, Schimmelpilze mitsamt ihren Sporen, Bakterien und Bazillen, Viren, Hautschuppen, Haare, allerlei Insektizide und Pestizide, eine Prise Blei, ein Quäntchen Quecksilber plus weiteres Schwermetall, dazu ein paar polychlorierte Biphenyle sowie ein Hauch polycyclische Aromaten – all das zusammen ergibt ein reichlich unbekömmliches Pulver. Es fördert Kopfweh und Abgeschlagenheit, begünstigt Allergien und Atemwegserkrankungen und vermag selbst Krebs heraufzubeschwören. Kein Wunder also, dass die nordamerikanische Environmental Protection Agency (EPA) unsere verschmutzten Heime unter den fünf gesundheitsschädlichsten Umweltbedrohungen

auflistet. Ob und wie gefährlich der Staub in unseren vier Wänden im Einzelfall jedoch tatsächlich ist, hängt in erster Linie von der Größe sowie der Schädlichkeit der Partikel ab.

### **BEDROHLICHE MIKROWELTEN**

Die Welt des Staubes bemisst sich in Mikrometern und ist in Grob-, Fein- und Feinststäube dreigeteilt. Ein Mikrometer ( $\mu\text{m}$ ) entspricht 1/1000 Millimeter (mm). Wem das zu abstrakt klingt, der nehme folgenden Vergleichsmaßstab: Das Satzzeichen „Punkt“ auf dieser Seite hat einen ungefähren Durchmesser von 0,2 mm, also 200  $\mu\text{m}$ . Das ist schon viel zu groß, um noch als Staubkorn durchzugehen! Unser Punkt gehört vielmehr in die Größenkategorie von Sand. Grobstaub ist dagegen etwa zehn Mal kleiner als unser Vergleichspunkt; seine durchschnittliche Partikelgröße beträgt zwischen 10 und 20  $\mu\text{m}$ . Mit bloßem Auge können wir ihn fast nicht mehr erkennen. In der Regel sind grobe Stäube das Werk der Natur. Man denke nur an all die Bodenpartikel und Pollen, die vom Wind über riesige Entfernungen getragen werden, an Seesalzaerosole bzw. -stäube, die aus dem salzhaltigen Wasser der Meere stammen oder einfach an die gräulichen Hautschuppen, die jedem von uns unentwegt vom Körper rieseln. Doch verursacht auch die menschliche Lebensweise Grobstaub in Massen. Ein Beispiel sind die Gummireste des Reifenabriebs, die sich überwiegend an Straßenrändern tummeln. Solche grobkörnigen Partikel verstopfen unsere Nasen, kleben auf den Schleimhäuten der Bronchien oder kratzen in den Augen, weshalb wir sie als besonders störend empfinden. Immerhin: Mit den Schleimhäuten der Atemwege als natürliche Schutzbarriere vermag unser Körper zumindest den größten Dreck aus der Luft abzufangen.

Weitaus problematischer sind hingegen feine Stäube. Denn je kleiner ein Staubkörnchen ist, umso leichter und tiefer dringt es in den menschlichen Körper ein. Kleine Staubbrocken zwischen 1 und 10  $\mu\text{m}$  fallen noch in die Kategorie des Feinststaubs, während die ultrafeinen Winzlinge unterhalb von 1  $\mu\text{m}$  zu den Feinststäuben oder Nanopartikeln zählen. Im Unterschied zu Grobstaub, der nur kurz in der Luft bleibt und dann als Staubniederschlag zu Boden sinkt, schweben die feinen Stäube bis zu vierzehn Tage durch die Gegend. Das Vertrackte dabei: Je länger sie sich in der Luft tummeln, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass wir sie einatmen. Auf diesem Wege gelangen sie dann bis in die tiefen Atemwege, wo sie sich selbst in den



feinsten Bronchialästchen und kleinsten Lungenbläschen einnisten. Selbst in den Blutkreislauf können sie von dort aus übertreten. Nicht umsonst wird ihnen eine besonders gesundheitsschädliche Wirkung nachgesagt. Was sie aber im Blut und sonst wo im Organismus genau anrichten, weiß bis heute noch niemand so recht. Möglicherweise stoßen sie aufgrund ihrer hohen Reaktivität vielfältige Entzündungsprozesse an. Denn so viel steht fest: Je kleiner die einzelnen Staubteilchen, desto größer ist ihre Oberfläche im Verhältnis zum Gewicht. Und da sich chemische Umsetzungen nun mal vorzugsweise an der Oberfläche abspielen, gehen Chemiker davon aus, dass die Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens umso größer ist, je mehr Oberfläche zur Verfügung steht.

Doch woher stammen die gefährlichen Fein- und Feinstpartikel nun eigentlich? In den selteneren Fällen handelt es sich um natürliche Stäube oder Staubbestandteile: Bakterien, Pilzsporen und Viren sind an dieser Stelle zu nennen, da allesamt deutlich unter 10 µm groß. Meist handelt es sich bei den gefürchteten Partikeln jedoch um künstliche Produkte und Rückstände von modernen Industrieprozessen. Ruß und Flugasche gehören dazu, die in industriellen Verbrennungsprozessen wie auch in Heizungen oder Motoren entstehen. In Gebieten ohne nennenswerte Industrieanlagen, z. B. in Kurorten, ist der Kraftfahrzeugverkehr die wichtigste Rußquelle, insbesondere das wachsende Heer von Diesel-Fahrzeugen. Nicht minder problematisch sind die ebenfalls lungengängigen Feinstfasern aus dem Bereich der Wärmedämmung und anderen Gewerbezweigen. Sie gelangten durch die Asbestproblematik zu trauriger Popularität und sind überall in der Luft – draußen wie drinnen – verbreitet. Ein ganzes Arsenal ultrafeiner Schadpartikel findet sich schließlich in jedem Zug Tabakrauch; selbst die größeren Teilchen liegen alle unterhalb der Größenordnung eines halben Mikrometers.

Der Gehalt an Staubteilchen schwankt in der Außenluft beträchtlich und hängt stark vom Wetter, der Tages- wie auch der Jahreszeit ab. So wirbelt jede noch so kleine Brise Wind zusätzlich Staub auf, derweil Regen die Luft wohltuend reinigt. Im Winter wiederum ist der Staubgehalt der Luft deutlich höher als im Sommer, was an den auf Hochtouren arbeitenden Heizungen sowie dem Streugut auf den Straßen liegt, das unsere Autos zunächst zerreiben und dann hochwirbeln. Sicherlich wenig überraschend: In den Städten ist die Staubbelastung vor allem durch den Straßenverkehr weitaus höher als auf



dem Land. Neueren Messungen zufolge sammeln sich in ländlichen Regionen etwa zehn Millionen Staubteilchen pro Kubikmeter Luft an, die kleiner als 1 µm sind. In Städten ist dieser Wert etwa zehn Mal so groß – in Raucherräumen drängeln sich sogar an die 1.000 Millionen Staubpartikel in dieser Luftmenge. Hinsichtlich der Stadtluft gilt: Ihr Staubgehalt nimmt etwa proportional der Anzahl ihrer Bewohner zu, was daran liegt, dass jeder einzelne von ihnen mit einem jeden Schritt beträchtlich Staub aufzuwirbeln vermag.

Stadtbewohner haben also gleich doppeltes Pech: Da sich Hausstaub zu einem Großteil aus dem Staub der Außenluft zusammensetzt, ist die Luft in ihrem Zuhause in der Regel ebenso verschmutzt wie die draußen. Durch Türen, Fenster und Ritzen jeglicher Art schwirrt der Dreck in die Heime hinein oder findet – an Schuhen und Kleidung haftend – Eingang. Stadtstaub spiegelt also das Leben der Stadtmenschen wider und ist infolge des hohen Verkehrsaufkommens von ziemlich rußiger Natur. Allerdings findet sich – und zwar sowohl in der Stadt als auch auf dem Lande – in den Staubflusen unter den Betten und hinter den Kühlschränken noch einiges mehr an krankmachenden und unappetitlichen Substanzen. Angesprochen sind damit die allergieauslösenden Ausscheidungen und Ausdünstungen all jener Kreaturen, die sich am Hausstaub gütlich tun.

### BIOTOP HAUSSTAUB

Es ist ein ziemlich buntes Völkchen, das in den staubigen Winkeln und Ecken unserer Wohnungen siedelt: Hausstaubmilben, Vorratsmilben, Mehl-, Moder- und Raubmilben, Staubläuse, Silberfischchen, hie und da auch eine Schabe, Schimmelpilze, Algen sowie Bakterien und Viren gehören mit dazu. Von den größeren Schaben und Silberfischchen einmal abgesehen, würden die meisten von ihnen ja gar nicht groß stören, da ohnehin nicht mit bloßem Auge erkennbar, gäbe es nicht ihre problematischen Ausscheidungen. So gilt der eiweißhaltige Milbenkot als ein besonders aggressives Allergen und Hauptverursacher der Hausstauballergie. Die mickrigen Kotbällchen zerfallen in kleinste Partikel, die in der Luft schweben und eingeatmet werden. Je nach Veranlagung plagt die Betroffenen dann eine allergische Bronchitis, Asthma oder Neurodermitis. Immerhin: Nicht alle Menschen sind gleichermaßen durch die Hausstaubmilben gefährdet. Betroffen sind vor allem die sogenannten Atopiker, die eine genetisch bedingte Neigung haben, Allergien zu entwickeln und

die rund ein Drittel der Bevölkerung ausmachen. Doch kommt es längst nicht bei allen von ihnen zum Ausbruch einer Allergie, obgleich die Häufigkeit steigt. Unter sämtlichen Allergikern in Mitteleuropa leiden letztlich nahezu zehn Prozent an einer speziellen Allergie gegenüber Hausstaub bzw. Hausstaubmilben; jeder siebte davon entwickelt im Laufe der Jahre ein Asthma.

Hausstaub, dieses komplizierte Ökosystem, dessen Zusammensetzung sich von Raum zu Raum verändert, ist der natürliche Aufenthaltsort der Milben. Nicht mal einen halben Millimeter groß, sehen die achtbeinigen Spinnentierchen unter dem Mikroskop plötzlich wie unförmige, gepanzerte Ungeheuer aus. Satt werden sie von den verschiedenen organischen Substanzen, die sich im Hausstaub befinden. An erster Stelle sind dies menschliche Hautschuppen, deren durchsichtiges Grau dem Hausstaub auch die graue Farbe verleiht. Pro Tag und Person verlieren wir ca. 1,5 Gramm Hautschuppen, die unbemerkt an uns herunter rieseln. Von dieser Menge können sich etwa 1,5 Millionen Milben einen Tag lang ernähren. Ein Milbenweibchen verschlingt pro Tag bis zu 50 Prozent ihres Körpergewichts an Hautschuppen, die sie in Form von Kotkugeln wieder ausscheidet. Auf einen Menschen mit einem Körpergewicht von 75 Kilogramm umgerechnet würde dies bedeuten, dass er jeden Tag an die 37 Kilogramm Essen aufnehmen und auch wieder ausscheiden müsste. In ihrem dreimonatigen Dasein fabrizieren die gefräßigen Milben das 200fache ihres Körpergewichts an Kotbällchen.

Ob auf verstaubten Bücherrücken oder unter dem Küchenstuhl – die Biester sind einfach überall und lassen sich auch durch noch so gründliches Putzen nicht gänzlich vertreiben. Mit Vorliebe lungern sie aber dort herum, wo sie besonders günstige Lebensbedingungen (sprich die meisten Hautschuppen) vorfinden, also auf Teppichen, Sesseln, Sofas – und natürlich im Bett. Wie Untersuchungen ergeben haben, halten sich hier oft zwischen 60 und 70 Prozent aller im Haus lebenden Milben auf. Kein Wunder, denn auf einer einzigen Bettdecke finden bereits an die 15.000 solcher Spinnentierchen Platz. Um sich so richtig wohl zu fühlen und zu vermehren, benötigen sie eine Luftfeuchte von mindestens 60 Prozent und Raumtemperaturen zwischen 20 und 30 Grad Celsius. Dies erklärt, weshalb sie gerade im Hochsommer und am Herbstanfang besonders zahlreich sind. Im Winter, wenn unsere Wohnungen geheizt werden, sinkt durch den Temperaturanstieg die relative Feuchte in den Innenräumen unter

60 Prozent. Die meisten der Tierchen sterben dann ab. Nur einzelne überstehen den Winter; sie vermehren sich dann im Frühjahr nach Ende der Heizperiode blitzschnell.

Dezimieren lässt sich das Heer der Hausstaubmilben, indem man ihm die bevorzugten Lebensbedingungen verdirbt. Das fängt schon mit dem Verzicht auf unnötige Staubfänger wie großblättrige Zimmerpflanzen, gerüschte Vorhänge oder verspielten Nippes in den Regalen an. Allergiker sollten – gerade im Schlafzimmer – auf das Raumklima achten und ausreichend lüften; die Luftfeuchtigkeit sinkt dadurch erheblich. Als wichtigste Maßnahme zur Reduzierung der unwillkommenen Gäste rund um die Bettstatt gilt aber nach wie vor die Verwendung eines milbendichten Matratzenschutzbezuges, dem sogenannten Encasing. Nicht nur trennt dieser den im Bett liegenden Allergiker von den lästigen Milben und ihren Ausscheidungen in der Matratze. Durch die geschlossene Abdeckung bleibt den Hungerleidern zudem auch der Genuss von neuen Hautschuppen versagt.

Eine Alternative zum Encasing ist die Hitzebehandlung der Matratzen. Temperaturen oberhalb 80 Grad Celsius überstehen die Tiere nicht. Mobile Matratzenreinigungsdienste, die mit ihren Gerätschaften von Haus zu Haus tingeln, behandeln auf Anfrage zunächst beide Seiten der Matratzen mit Heißluft, saugen anschließend den darin enthaltenen Staub mitsamt Milben und Kotbällchen ab und imprägnieren die Matratze zuletzt mit einem Antimilbenmittel. Kleinteilige Kissen, Decken und Überzüge lassen sich dagegen im Kochprogramm durch die Waschmaschine schleusen. Ein Tipp in Sachen Wohnungsputz: Trockenes Abstauben und Kehren wirbelt bloß unnötig Staub auf und verschlimmert die Beschwerden. Da ist es schon sinnvoller, feucht zu reinigen und eventuell spezielle Sprüh-Extraktionen zu verwenden, die nicht nur den Feinstaub binden, sondern zusätzlich mit einem Antimilbenmittel ausgestattet sind. Was das Staubsaugen angeht: Moderne und hochwertige Geräte sind inzwischen mit einem sogenannten HEPA-Filter (High Efficiency Particulate Air) ausgestattet, der bewirkt, dass während des Saugens selbst feine Partikel von der Größe der Milbenkot-Allergene im Innern des Staubsaugers verbleiben und nicht wieder in die Luft gepustet werden.

Leider sind die meisten dieser Maßnahmen nur gegen Milben und nicht gegen die ebenfalls allgegenwärtigen Schimmelpilze wirksam. Für sie ist der Hausstaub mit seinem hohen Anteil an feinsten Textilfasern, die als Abrieb aus unserer Kleidung, aus Sofakissen, Handtü-

chern und Teppichen stammen und mit seiner Unmenge an menschlichen und tierischen Hautpartikeln und Haaren sowie den Massen an Papierfetzchen aus Zeitungen und Toilettenpapier ein gefundenes Fressen. Die nötige Feuchte, die sie zum Gedeihen brauchen, ist in den meisten Wohnungen allemal gegeben. Unangenehm sind die gasförmigen Ausdünstungen der Schimmelpilze, die stark befallenen Wohnungen ihren charakteristisch modrigen Geruch verleihen. Ein ernstes Problem bilden ihre Sporen, die Eiweißstoffe enthalten und daher – genau wie der Milbenkot – Allergien auszulösen vermögen. In einer durchschnittlichen Wohnung segeln etwa 1.000 solcher Sporen pro Kubikmeter Luft – eine beträchtliche Menge, führt man sich vor Augen, dass sich jede einzelne von ihnen in kürzester Zeit zu einer ganzen, wiederum sporenbildenden Pilzkolonie auswachsen kann. Bei einigen Schimmelpilzarten reichen bereits an die 100 der kugeligen Gebilde pro Kubikmeter Luft aus, um ein Jucken in den Augen und ein Kratzen im Hals herbeizuführen. In jüngster Zeit wird ihnen zudem angelastet, für das verstärkte Auftreten von Chronischer Rhinosinusitis (CRS) mitverantwortlich zu sein. Von der Erkrankung Gequälte – in den USA sind das bereits annähernd 40 Millionen Menschen – klagen über ständig verstopfte Nasen und Nebenhöhlen. Und zu guter Letzt spricht auch noch manches für einen Zusammenhang zwischen dem Vorkommen von Pilzsporen und dem gehäuftem Auftreten von Asthma.

Nicht nur Sporen, auch Bakterien brauchen Feuchtigkeit in der Luft, um gedeihen und sich vermehren zu können. Daher vermögen Luftbefeuchter, Klimaanlage, Whirlpools und unter Umständen sogar Inhalatoren die Verbreitung bakterieller Infektionen zu fördern. Berühmt geworden ist dieser Zusammenhang bei der sogenannten Legionärskrankheit, die 1976 erstmals beschrieben wurde. Bei einem Veteranentreffen von US-Streitkräften in einem Hotel in Philadelphia erkrankten damals 221 der dort versammelten älteren Männer an einer schweren Infektion mit Husten, Atembeschwerden und hohem Fieber. Die Ärzte diagnostizierten zunächst eine Lungenentzündung und verabreichten demgemäß Penizillin. Die Behandlung zeigte wenig Erfolg – vierunddreißig der Erkrankten verstarben. Erst ein halbes Jahr später wurde der Erreger der mysteriösen Infektion entdeckt, *Legionella pneumophila*, ein Bakterium, das in der Natur weit verbreitet ist und mit dem die meisten Menschen sowieso irgendwann in Berührung kommen. Es kann bei älteren und immungeschwächten

Menschen zu starken Erkältungssymptomen führen, die in etwa 20 Prozent der Fälle tödlich enden. In dem besagten Hotel in Philadelphia hatte sich der Keim, der sich vor allem in warmem Wasser bei Temperaturen zwischen 30° Celsius und 45° Celsius vermehrt, in der Warmwasserversorgungsanlage breit gemacht. Andere Fälle verweisen auch auf Luftbefeuchter als optimale Brutstätte für den Erreger. Auf den feinen Wassertröpfchen segelt dieser durch die Luft, bis das Wasser verdunstet, um es sich dann auf feinen Staubpartikeln bequem zu machen. Auf die gleiche komfortable Art und Weise reisen, wie inzwischen bekannt ist, auch noch andere Bakterien und Krankheitserreger durch unsere heimischen Gefilde.

Freilich wissen wir mittlerweile aber auch: Zumindest die Keime im Dreck haben durchaus ihr Gutes. Kleine Kinder, die früh und häufig mit Staub und Schmutz in Berührung kommen, erkranken später seltener an Allergien, Asthma und Lymphdrüsenkrebs. Es scheint, dass die Bakterien, Viren und eiweißhaltigen Verbindungen im Staub die Ausbildung und Reifung des Immunsystems befördern. Auf dieser Beobachtung fußt die sogenannte Hygiene-Hypothese, die besagt, dass das staub- und keimarme Leben in hochentwickelten Industrieländern die Immunabwehr nicht mehr genügend auf Vordermann zu bringen vermag. Die Folge eines allzu hygienischen Lebens: Irgendwann reicht der bloße Kontakt mit ein paar Körnchen Hausstaub aus, eine hysterische Immunantwort einzuleiten. Dazu passt, dass in Deutschland und anderen Ländern Westeuropas sich mittlerweile schon ein Fünftel der erwachsenen Bevölkerung mit Allergien herumplagt. Für die Hygiene-These spricht auch, dass gerade Einzelkinder von gut ausgebildeten und wohlhabenden Eltern besonders anfällig für Allergien sind, verbringen sie doch ihre Kindheit größtenteils im Innern gepflegter Wohnungen. Bauernkinder dagegen, die regelmäßig in Berührung mit Tieren, Heu, Dung oder Boden kamen, litten seltener an allergischen Erkrankungen. Ihr Immunsystem scheint für die Begegnung mit Allergenen weitaus besser gewappnet zu sein. Nach dem Motto „Was mich nicht umbringt, macht mich stärker“ scheint eine ordentliche Portion Dreck in Kinderjahren durchaus von Vorteil zu sein. Vorausgesetzt, dass sich darin nicht allzu große Mengen jener modernen giftigen Chemikalien befinden, die neuerdings immer häufiger in Wohnungen aufzufinden sind.

## CHEMIE DES HAUSSTAUBS

Viel Staub aufgewirbelt haben neuere Untersuchungen, die zeigen, dass Hausstaub heutzutage mit zahlreichen Risiko-Chemikalien ver-  
seucht ist. Das Tückische daran: Zwar treten die Umweltgifte nur in  
Spuren auf, sie sind aber hochgradig gefährlich. Ein Teil von ihnen  
schleicht sich von draußen kommend in unsere Wohnstätten ein. An  
giftigen Schwermetallen sind dies vor allem Chrom, Blei und Queck-  
silber, die – da in zahlreichen Konsumgütern wie z. B. in Batterien ver-  
wendet – noch in relativ großen Mengen zirkulieren. Fatalerweise rei-  
chern sie sich im Hausstaub an, was dazu führt, dass ihre Konzentration  
innerhalb der eigenen vier Wände oft höher ist als im Dreck draußen.  
Auch aus der Landwirtschaft und dem Gartenbau stammende Pesti-  
zide und Herbizide nisten sich mit Vorliebe im Hausstaub ein.

Der Großteil der unliebsamen Umweltgifte ist jedoch auf die zahl-  
reichen Haushaltsgüter und Einrichtungsutensilien zurückzuführen,  
die unsere Wohnungen schmücken oder funktional gestalten. Wissen-  
schaftler des Hamburger Instituts für Hygiene und Umwelt wollten  
vor ein paar Jahren genauer wissen, welche schwerflüchtigen organi-  
schen Umweltchemikalien sich im Hausstaub niederlassen und nah-  
men zwischen 1998 und 2000 regelmäßig Staubproben aus 65 Ham-  
burger Wohnungen ins Visier. Zu den besonders toxischen Stoffen, die  
sich in hohen Konzentrationen angereichert hatten, zählte unter an-  
derem die Gruppe der Phthalate, deren Abkömmlinge als Weichma-  
cher in den meisten PVC-Produkten enthalten sind. Auch Chlorpa-  
raffine und diverse Zinnverbindungen, die ebenfalls in PVC-Artikeln  
sowie in Lacken, Farben, Kleb- und Dichtstoffen auftreten, gehörten  
zu den Spitzenreitern. Bemerkenswert ist ebenso der hohe Anteil an  
Insektiziden, darunter Chlorpyrifos, Permethrin und sogar DDT, die  
in Schädlingsbekämpfungsmitteln für Hunde und Katzen zu finden  
sind oder zur Imprägnierung von Holzdielenböden oder von Teppich-  
böden mit Wollflor Verwendung finden.

Ganz gleich, ob in Elektrogeräten, Möbeln, Bodenbelägen oder  
Holzverkleidungen: Schädliche Chemikalien sind mittlerweile überall  
enthalten. Nach und nach entweichen sie aus ihren Ursprungsmateri-  
alien und sammeln sich im Staub an. Im Gemisch verstärken sie sich  
möglicherweise gegenseitig in ihren toxischen Wirkungen oder ver-  
mögen gar die Effekte all der anderen chemischen Verbindungen zu  
steigern, denen wir ansonsten im Alltag ausgesetzt sind. Diese Vermu-  
tung äußerten zumindest amerikanische Wissenschaftler, die im Auf-

trag der Umweltorganisationen Silicon Valley Toxics Coalition, Computer TakeBack Campaign und Clean Production Action unlängst Stäube auf Computern und Monitoren durchleuchteten und dabei hohe Konzentrationen an bromierten Flammschutzmitteln fanden. Die höchstwahrscheinlich nervenschädigenden Substanzen würden in gasförmigem Zustand aus den Plastikgehäusen an die Umwelt und damit an den Hausstaub abgegeben. Schreibtischarbeiter, die lange Zeit vor ihren Geräten sitzen und dabei die giftigen Computerstäube inhalieren, sind besonders bedroht. Tipps, wie sich Computerbenutzer wirkungsvoll schützen können, vermochten die Forscher leider nicht zu geben. Immerhin: In der EU werden bromierte Flammschutzmittel ab Mitte 2006 in elektrischen und elektronischen Geräten untersagt. Doch aufgrund ihrer unaufhaltsamen Ausgasung in den bisherigen Produkten würde ihre Konzentration, so ein weiteres Ergebnis der Studie, selbst bei einem weltweiten Verbot weiterhin ansteigen.

Schwerflüchtige organische Chemikalien sind womöglich auch die Ursache für ein vergleichsweise neuartiges Staubphänomen, die sogenannten „schwarzen Wohnungen“. Seit ungefähr zehn bis 15 Jahren lassen sich immer häufiger plötzlich auftretende, massive Staubablagerungen in Wohnungen beobachten, ohne dass es dafür eine erkennbare Ursache gibt. Pechschwarze Streifen und Schlieren zeichnen sich – ganz ohne Vorwarnung – von einem Tag zum anderen auf Wänden, Schränken, Gardinen und Fliesen ab. Sie erwecken den Eindruck, als sei ein Kamin verpufft oder ein Schwelfeuer abgebrannt. Die schwarzen Flächen verschmieren wie ein Ölfilm und lassen sich selbst mit scharfen Reinigungsmitteln kaum entfernen. Zu Rate gezogene Experten sprechen im Zusammenhang mit den Schwärzungen auch von „Fogging“ oder „Black magic dust“.

Unter Fogging wird in der Automobilbranche die Entstehung eines klebrigen Films verstanden, der sich in neuen Fahrzeugen als Folge von Ausgasungen schwer flüchtiger Kunststoffbestandteile an der Innenseite der Windschutzscheibe bildet. Vergleichbare Prozesse kommen auch in Wohnungen vor, vor allem wenn sie frisch renoviert oder neu möbliert sind. Auch hier entströmen den Farben und Möbeln schwerflüchtige organische Verbindungen und lagern sich auf glatten Oberflächen ab. Der eigentliche Vorgang des „Schwärzens“ entstünde jedoch erst, so die Verfechter der Fogging-Hypothese, durch die Ablagerung und anschließende Quellung von feinem Staub auf dem klebrigen Chemikalien-Film. Hausstaub, der normalerweise grau

ist, würde erst durch den Vorgang des Quellens schwarz werden; etwa so, als wische man Staub mit einem feuchten hellen Lappen ab. Dieser sei dann hinterher auch nicht grau, sondern pechschwarz gefärbt.

Befürworter der Ruß-Hypothese bevorzugen dagegen eine andere Erklärung: Sie sehen in den schwarzen Ablagerungen nichts anderes als Unmengen von ultrafeinen Rußpartikel. Aufgrund ihrer winzigen Größe verhielten sie sich ähnlich wie Gase und würden sich überall im Raum verteilen. Nach mehreren Tagen des Herumsegelns durch die Luft blieben die schwarzen Rußkörnchen dann vor allem an kalten Oberflächen haften und bildeten so die unschönen Flecken. Als Rußquellen kommen vor allem flackernde und schlecht brennende Kerzen wie auch rußende Öllämpchen in Frage, vor allem, wenn sie in modernen Wohnungen mit gut abgedichteten Fenstern aufgestellt werden. Als vorbeugende Maßnahmen gegen den black magic dust empfehlen sich denn auch häufiges Lüften und die Verwendung dünner Kerzen, die weitaus weniger rußen und qualmen als dicke Wachslichter.

Eine Unmenge an unschönem und vor allem unbekömmlichem Qualm erzeugt das Rauchen. Ohne zu übertreiben: In dem „blauen Dunst“ sind sage und schreibe 4.000 verschiedene chemische Verbindungen enthalten. Allein fünfzig davon können Krebs verursachen. Da die meisten Zigarettenfeuerchen in Innenräumen angesteckt werden, kreiseln in der Luft und wirbeln im Staub von Raucherhaushalten etwa doppelt so viele lungengängige Nanopartikel wie in den Wohnungen von Nichtraucher. Doch ganz gleich, woher die giftigen Chemikalien auch stammen mögen, ob aus Farben, Möbeln oder Tabakrauch: Sie sind vor allem für krabbelnde Kleinkinder belastend, die sich überwiegend am Boden aufhalten und so ziemlich alles in ihre Mäuler stopfen, was ihnen dort unterkommt.

Gerade der tiefsitzende Staub in Teppichen und Teppichböden, der beim normalen Staubsaugen nicht erwischt wird, hat es in sich. Einer neueren Einschätzung aus den USA zufolge nimmt dort ein durchschnittliches Krabbelkind in seinen ersten Lebensjahren durch den Kontakt mit Teppichstaub ungefähr soviel krebserregende Benzpyrene auf, als hätte es täglich drei Zigaretten gepafft. Überhaupt sind die Auswirkungen der oben genannten Umweltchemikalien alles andere als harmlos. Bei entsprechend hoher Konzentration können sie so ziemlich alles von einer Verzögerung der geistigen Reifung über Nervenschäden bis hin zu Lungenerkrankungen und Krebs be-



wirken. Eltern sollten daher möglichst während der Zeit, in der sich ihre Zöglinge auf vier Beinen fortbewegen, auf Teppichböden, Teppiche und Läufer verzichten.

### LEBEN IN DER EIGENEN STAUBWOLKE

Für Geschöpfe jenseits des Krabbelalters geht die größte Gefahr aber weniger vom Dreck am Boden, sondern vom Schmutz in der Luft aus. Es sind schließlich die im Raum herumschwirrenden Klein- und Kleinstpartikel, die über den Atem den Weg in unsere Lungen finden. Als nordamerikanische Wissenschaftler 1990 wieder einmal den Staubgehalt unserer Atemluft überprüften, brachten sie ein neuartiges Phänomen ans Licht, die sogenannte „personal cloud“. Bei dem berühmt gewordenen Experiment verdrahteten sie 178 Testpersonen aus Kalifornien mit tragbaren Staubüberwachungsgeräten, die diese zwölf Stunden am Tag in den eigenen vier Wänden beim Kochen, Lesen, Schlafen etc. mit sich zu führen hatten. Parallel dazu bestimmten die Forscher mittels fester Standmessgeräte die Innen- und Außenluft der Wohnungen ihrer Versuchskaninchen auf den Staubgehalt. Der überraschende Befund: Bereits der Staubgehalt von Innen- und Außenluft im untersuchten Bezirkes war vergleichsweise hoch; er befand sich aber immerhin noch unterhalb des gesetzlichen Grenzwertes. Hingegen lag die Staubmenge, die anhand der tragbaren Staubmonitore für die einzelnen Versuchskandidaten ausgemacht wurde, deutlich darüber. Die Abweichung zwischen den zwei Werten erklärten sich die Wissenschaftler über die personal cloud, jener individuellen Wolke aus Staubpartikeln, die jeden einzelnen von uns permanent umhüllt.

Welche Faktoren welchen Einfluss auf unsere Staubhüllen haben – hierüber zerbrechen sich Staubforscher nach wie vor die Köpfe. Fest steht, dass sich Staubkörnchen aus unserer unmittelbaren Umwelt auf Körperoberfläche und Kleidung niederlassen. Mit jeder Bewegung, ja mit jedem Atemzug rütteln wir sie wieder auf, so dass sie unsere Körper ständig umkreisen. Während in der personal cloud eines Waldarbeiters Unmengen an winzigen Holzstäubchen schwirren, bedrängen den Verkehrspolizisten Schwärme von Rußpartikeln. Handarbeitslehrerinnen dürften hingegen von flauschigen Woll- und Garnfusselchen sanft umwohrt werden. Doch nehmen wir Menschen nicht nur den Staub unserer Umgebung auf – wir sondern zugleich reichlich Partikel ab, ganz egal, ob es sich dabei um Hautschuppen und Haare oder um die winzigen Fäserchen handelt, in die sich unsere Kleidung

nach und nach auflöst. Ein kleiner Klaps auf die Schulter genügt, und schon fliegen Unmengen kleinster Fusselchen aus dem Mohairpullover empor. Auch wirbelt jeder Schritt und jeder Handgriff, den wir tun, den Staub in unserer Umgebung auf, so dass dieser den Charakter unserer persönlichen Staubwolke mitbestimmt. Rauchen und Kochen – hierin sind sich Wissenschaftler einig – produzieren die meisten Feinstäube. Beim Braten, Backen, Grillen und Frittieren von Nahrungsmitteln bilden sich enorme Teilchenmengen, die je nach Beschaffenheit krebserregend sein können. Die mitunter hektischen Bewegungen beim Hantieren am Herd tun ein Übriges, um das Kochen zu einer extrem staubigen Angelegenheit werden zu lassen: So ist in den Stunden, in denen wir unsere Mahlzeiten zubereiten, der Anteil an Nanopartikeln in der Luft zwanzig Mal höher als sonst.

Dass auch andere Haushaltstätigkeiten Staubstürme provozieren können, hat jüngst Andrea Ferro von der Clarkson Universität in Potsdam, New York, gezeigt. Mit ihren Kollegen stellte sie in einem Haushalt mehrere Partikelfallen auf und machte sich dann an alltägliche Arbeiten wie Staubsaugen, Staubwischen oder Wäschefalten. Auch ein Tänzchen legten die Forscher zwischendurch auf das Parkett. Staubwischen – so eines ihrer weniger überraschenden Ergebnisse – befördert Unmengen von Staubpartikeln in die Atemluft. Doch wer hätte damit gerechnet, dass beim bloßen Herumlaufen ähnliche Staubmengen in die Atemluft gepustet werden wie beim Staubsaugen. „Den stärksten Effekt hatten zwei Leute, die einfach nur in der Wohnung herumgingen oder auf Sitzmöbeln saßen“, berichtete die Forscherin im Fachblatt „Environmental Science & Technology“. Beim Tanzen hing die aufgewirbelte Staubmenge von der Zahl der Tänzer, der Art ihrer Bewegungen und dem Bodenbelag ab. So hätte es beim Samba auf einem Läufer wesentlich stärker gestaubt als auf einem Holzfußboden. Da ein Großteil der ungesunden Staubpartikel aus dem Freien in die Wohnungen geschleppt wird, rät die Wissenschaftlerin, sich die Straßenschuhe an der Haustür auszuziehen. Dies könne das Fußboden-Partikelreservoir beträchtlich reduzieren.

### STAUB NACH MASS

Indessen zielte das Interesse der Staubforscher der Deutschen Montan Technologie (DMT) in Essen weniger auf eine Reduzierung des Hausstaubs. Ihr Anliegen während der letzten Jahre war anderer Natur, ging es ihnen doch darum, Staub herzustellen. Ein künstlicher

Staub sollte es sein, mit genau festgelegter Korngrößenverteilung. Von der Struktur und den physikalischen Eigenschaften her hatte er dem gemeinen Hausstaub möglichst stark zu ähneln; auch sollte er in beliebiger Menge herstellbar sein. Die wichtige Anforderung an das Kunstprodukt lautete aber: Es durfte bei denen, die tagaus und tagein mit ihm umzugehen hatten, nicht zu Allergien oder Vergiftungen führen und musste daher frei von Allergenen und toxischen Substanzen sein. Als Klientel waren in erster Linie Staubsaugerhersteller anvisiert, die den Normstaub zur Entwicklung neuer Filtertechniken oder zur Prüfung der Leistungsfähigkeit einsetzten. Bald schon interessierte sich auch die Stiftung Warentest für den genormten Prüfstaub. Inzwischen bedient die DMT weitere Kunden, nämlich die Betreiber von Klima- und Filteranlagen für Krankenhäuser und für Betriebs- und Reinräume der Chip-Industrie.

Ordinärer Hausstaub taugt nicht für Test- und Prüfzwecke, da er einerseits mit zu viel problematischen Inhaltsstoffen belastet und andererseits viel zu uneinheitlich zusammengesetzt ist. Schließlich staubt es überall und zu jeder Zeit ein wenig anders. Im Frühjahr schleicht sich längst nicht derselbe Staub in unsere Heime ein wie im Winter. Individuelle Lebensstile, die Art der Bodenbeläge, ob Kellerwohnung oder Obergeschoss, Raucher- oder Nichtraucherhaushalt, ja selbst das Geschlecht der Wohnungsgenossen – sie alle beeinflussen den Partikelmix. Auf der Suche nach der Rezeptur für ihren Universalhausstaub untersuchten die Staubforscher der DMT zunächst landauf, landab Dutzende von Hausstaubproben. Aus Großstädten und Dörfern der Provinz, aus Single-Haushalten und Großfamilien gingen gefüllte Staubsaugerbeutel bei der DMT ein und wurden dort mit Sorgfalt und Hingabe nach Körnung, Konsistenz und Verhalten untersucht. Das Ergebnis: Die regionalen Unterschiede machten sich bei der Zusammensetzung des Staubes weniger stark bemerkbar als erwartet. Ausschlaggebend war vielmehr die jeweilige Lebensweise; wichtig war z. B., ob Kinder oder Katzen mit im Haushalt lebten.

Nachdem sie die Staubproben unter die Lupe genommen hatten, knobelten die Forscher daran, den kleinsten gemeinsamen Nenner für ihren Prüfstaub zu finden. Der lautete in etwa so: Hausstaub, wie er sich im Staubsaugerbeutel findet, besteht zu 80 bis 85 Prozent aus faserigen Bestandteilen, 15 bis 20 Prozent sind körniger Natur. Bei ihrem hausgemachten Staub versuchten sie, diese Beschaffenheit durch die Fasern des afrikanischen Kapok-Baumes nachzuahmen. Als kör-

nige Zutaten mengten sie fein gemahlenen Zellstoff bei, der unter anderem die Brötchenkrümel im Hausstaub ersetzen soll. Pulver aus Dolomit soll hingegen die mineralischen Hausstaubbestandteile nachahmen. Da der DMT-Prüfstaub nach einem Geheimrezept zusammengemischt wird, sind die restlichen Zutaten aber nicht bekannt. Im Grunde gilt für sämtliche Prüfstäube: Gemessen an ihren natürlichen Vorbildern bleiben sie aufgrund ihrer wenigen Zutaten wohl stets ein „Armutszeugnis“. Doch ist es gerade die Überschaubarkeit und Einheitlichkeit der Komponenten, die ihren Erfolg beim Prüfen, Testen und Simulieren von Filteranlagen sichern.

### ZEITZEUGE HAUSSTAUB

Für historische Umweltforscher haben künstliche Stäube jedoch den Makel geschichtsloser Stäube – von daher sind sie ihnen ein Gräuel. Denn gerade im ordinären Hausstaub sammelt sich für gewöhnlich all das an, was unsere Gesellschaft herstellt, verbraucht oder an unerwünschten Stoffen in die Welt setzt. Dicke Staubschichten, die über Jahrzehnte hinweg ungestört auf ausrangiertem Mobiliar und Spielzeug wachsen, vermögen so die unglaublichsten Geschichten über längst verflossene Zeiten zu erzählen. Daher nutzen findige Wissenschaftler den Hausstaub mittlerweile als historische Quelle.

Zu ihnen gehört auch Paul Liroy von der nordamerikanischen Rutgers Universität, der im Hausstaub einen „grobe, aber zuverlässigen Indikator der Luftverschmutzung in der Vergangenheit“ sieht. Zusammen mit seinen Kollegen durchforstete er staubige Dachkammern und Kellerräume von bis zu 120 Jahre alten Häusern der Gemeinde Dover im US-Bundesstaat New Jersey und überprüfte die gezogenen Staubproben auf Umweltgifte. Im Fall von Blei enthielt Staub aus über 20 Jahre alten Häusern deutlich mehr des giftigen Schwermetalls als der aus neueren Gebäuden. Die Erklärung klingt plausibel: Bis in die 1980er-Jahre wurde Blei als Antiklopfmittel in Benzin eingesetzt. Über Jahrzehnte betrachtet stimmt der zeitliche Verlauf der Blei-Konzentrationen im Staub daher relativ gut mit den Blei-Emissionen aus dem Straßenverkehr überein, wie die Forscher unlängst im Fachblatt „Atmospheric Environment“ berichteten. Nicht nur der Bleigehalt, auch die Konzentration des radioaktiven Isotops Cäsium-137 stieg mit dem Alter der Häuser an. Laut Liroy und seinen Kollegen lässt sich dies mit dem radioaktiven Niederschlag erklären, der in Folge der oberirdischen Kernwaffentests in den 1950er und

60er Jahren in beträchtlicher Menge auf das Land rieselte. Kernkraftwerke schlossen die Forscher als Herkunftsquelle für das Cäsium-Isotop aus, da in dem untersuchten Hausstaub keine weiteren Spuren von radioaktivem Strontium oder Jod zu finden waren.

Am Hausstaub wie auch an anderen Stäuben lassen sich also unterschiedliche historische Abschnitte ablesen. Seine Mikrowelt spiegelt die Makrowelt – sowohl im Hinblick auf vergangene als auch auf gegenwärtige Zeiten. Giftige Staubflusen kommen nicht von ungefähr, sondern sind das Produkt einer bedenklichen Lebensweise. Und so könnte uns der unerwünschte Dreck im Hause als mahnendes Abbild unserer Umwelt am Ende doch noch einen nützlichen Dienst erweisen.

#### LITERATUR

AMATO, Joseph A.: Von Goldstaub und Wollmäusen. Hamburg / Wien 2001.

HOLMES, Hannah: The Secret Life of Dust. From the Cosmos to the Kitchen Counter, the Big Consequences of Little Things. New York 2001.

## C. STAUBLAPPEN UND REINRAUMTECHNIK:

### KÄMPFE GEGEN DEN STAUB

Kultur und Hygiene haben dem Staub den Kampf angesagt. Putzen und Entstauben bestimmen den Alltag. Es soll sogar Menschen geben, die das glücklich macht. Doch der staubfreie Raum bleibt auch für sie eine Utopie. Bei der kleinsten Bewegung eines Menschen entstehen hunderttausende Staubpartikel, welche in der Luft herumwirbeln. Da helfen kein Wischen und kein Saugen mehr. Ingenieure haben deshalb den sogenannten Reinraum konstruiert, in dem die Luft kontinuierlich abgesaugt und gefiltert wird, um eine möglichst staubfreie Atmosphäre zu gewährleisten. Der Reinraum ist keine Skurrilität – sondern eine der wichtigsten Erfindungen der letzten Jahrzehnte. Denn ohne den Reinraum könnten die meisten Produkte, die unseren modernen Alltag prägen, wie Handy oder Computer, nicht gefertigt werden.

ULRICH HOHOFF

## BÜCHERSTAUB

STREIFZUG DURCH EIN UNERFREULICHES TERRAIN VOM  
ALTERTUM BIS HEUTE

*Wenn ein Papier abhanden kommt  
Auf das man geschrieben hat  
Das ist nicht schlimm.  
Vielleicht nämlich liest es einer  
Und verändert sich.  
Schlimm ist nur  
Wenn das Papier zerfällt.*

*Bertolt Brecht*

Nach einem geflügelten Wort des amerikanischen Schriftstellers John Steinbeck ist die Kultur eines Landes für jeden Bürger mit bloßem Auge erkennbar: „Man erkennt sie an der Dicke des Staubes auf den Buchrücken in den öffentlichen Bibliotheken.“ (Deppert 1985)

Demnach sollten wir uns heute auf dem höchsten Stand der Kultur befinden. Verstaubte Bücher sind, zumindest in deutschen Bibliotheken, selten geworden. Mag der Inhalt vieler Werke verstaubt sein – das Buch ist in der Regel in ordentlichem Zustand. Vorbei sind die Zeiten, als Leser alter Bücher sich im Lesesaal der Bibliothek die Hände beschmutzten und nicht heimgehen konnten, ohne sich vorher die Hände zu waschen. Heute dagegen verfügen größere Bibliotheken in der Regel über ein angemessenes Gebäude und über ein klimatisiertes Magazin. Wer ein älteres Werk in die Hand nimmt, setzt voraus, dass das Buch und sein Einband auf ihren Zustand hin geprüft und, soweit die Mittel dafür ausreichen, sachgerecht gepflegt worden sind.

### **„KNIETIEF IN WEISSER ASCHE“ – VERSTAUBTE UND VERBRANNT BÜCHERSAMMLUNGEN**

Auch wer für die Gegenwart aus guten Gründen lieber nicht den höchsten Stand der Kultur reklamiert, wird vermuten, dass in früherer Zeit die Probleme mit Staub an Büchern ganz erheblich waren. Es erstaunt, dass Belege für diese Aussage nicht ohne Weiteres zu finden sind. Wer sich für die Entstehung und Geschichte des Buches, des Handels mit Büchern und für das Schicksal von Bibliotheken oder privaten Büchersammlungen interessiert und dort Quellen zu unserem Thema sucht, der betritt ein kaum vermessenes Terrain.

Es beginnt damit, dass die gängigen Wörterbücher zum Themenfeld Buch – Buchhandel – Bibliothek die Begriffe *Bücherstaub* und *Papierstaub* nicht verzeichnen (Rautenberg 2003, Hiller/Füssel 2003). Auch eine Suche in spezielleren Fachlexika zum Buch- und Bibliothekswesen ist unergiebig. Deren Verfasser scheinen sie so sorgfältig zu vermeiden wie Buchhändler und Bibliothekare es vermeiden, dass Werke einstauben, die ihnen anvertraut sind. (Corsten, Pflug u. Schmidt-Kunsemüller 1989 ff.; Löffler u. Kirchner 1935-1937; Kirchner 1952-1956) Berühmt gewordene Büchersammler geben in aller Regel auch keine Hinweise auf unser Thema, ebenso wenig die Literatur über sie. Auch tragen Darstellungen und Quellenschriften zur Geschichte des Buches, des Buchhandels und der Bibliotheken wenig zum Erfolg bei – ganz zu schweigen von den vielen Prachtbänden über die Geschichte berühmter Bibliotheken.

Trotzdem lässt sich unsere These belegen: Aufbewahrungsbedingungen für Bücher waren in früheren Jahrhunderten in den meisten Fällen recht einfach. Manche Büchersammlungen verfielen Jahrzehnte, ja Jahrhunderte lang, bevor man ihren Wert erkannte und sie öffentlich zugänglich machte.

Als erstes Beispiel sollen ältere Aufzeichnungen über zwei Bibliotheken in der Stadt Erfurt dienen. Der Jurist Heinrich Ernst Seebach stellte um 1737 einen handschriftlich erhaltenen Bericht „Thüringia literata“ zusammen, der Nachrichten „Von den Bibliotheken in Thüringen“ enthält, darunter eine „Historia der Boineburgischen Universitäts-Bibliothek in Erfurth“, die nach Seebach 1407 begründet worden sei (Seebach 1753). Er berichtet, in den Jahren 1509/1510 seien „alle Bücher, Documenta, Briefschafften, Manuscripta und Nachrichten herumgeworfen, zerschnitten, verderbt, zerrißen, verbrannt, verstreuet und zertreten“ worden. Ebenso drastisch geht es



weiter: Die Reste der Bibliothek seien 1590 „größentheils in Asche verkehret“ worden, und jene Bände, die diese Katastrophe überlebt hätten, in eine entlegene Ecke „geschmissen“ worden.

Seebach beschreibt den Umgang mit Büchern in einem Kollegium der Universität Erfurt, die 1392 gegründet worden war. Der Name Boineburg aber lässt den Kenner aufhorchen. Sollte die Universität Erfurt mit ihrem Kleinod so schäbig umgegangen sein? Eine Nachprüfung ergibt, dass Seebach gar nicht die „Boineburgische Universitäts-Bibliothek“ selbst meinte, sondern eine kleinere, schon vorher vorhandene Sammlung. Denn die große Privatbibliothek des kurmainzischen Ministers und Bibliophilen Johann Christian Boineburg (1622-1672) mit rund 9.000 Bänden kam erst 1716 durch Schenkung seines Sohnes an die damals kurmainzische Universität Erfurt. Den Schlagwort-Katalog dieser Privatbibliothek hatte übrigens der Philosoph und Universalgelehrte Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) erstellt, der für den Minister ab 1668 einige Jahre als Bibliothekar tätig war.

Nicht nur in diesem Kollegium der Universität Erfurt setzten Bücher deutlich Staub an. Die berühmteste historische Bibliothek der thüringischen Landeshauptstadt ist die Bibliotheca Amploniana, gegründet von Amplonius Rating de Berka (gestorben 1435), der eine der größten mittelalterlichen Privatbibliotheken zusammengetragen hatte. Er stiftete sie – zusammen mit einem neuen Kollegiumsgebäude und Geld für Stipendien – der Universität Erfurt, deren Rektor er auch gewesen ist. Sie wurde in einem eigenen Gewölbe aufgestellt. Besitzer war nicht die Universität, sondern das Kollegium. Nach dem Ende des Dreißigjährigen Krieges verwaiste die Bibliothek. 1704 erhob sich folgende Klage über die Sammlung: „Zu einer [Bibliothek, der Verf.] haben die Catholischen den Schlüssel, welche unten in einem Gewölbe des Collegii Amploniani stehet, und ein paar Repositoria voll Manuscripta hat, die aber voller Staub und Unrath liegen, und von niemandem gebraucht werden, ob gleich viel Tractate vom Augustino und von andern Patribus darunter zu sehen.“ (Tetzel 1704) Einige Jahre später, 1709, besuchte der berühmte Büchersammler Zacharias Konrad von Uffenbach (1683-1734) aus Frankfurt die Universitätsstadt Erfurt und bestätigte in seinem später erschienen Reisebericht, dass Teile der Büchersammlungen in Erfurt „ganz vernachlässiget, und mit Staub und Schimmel überzogen“ seien (Uffenbach 1753).

Schließlich beklagte 1712 der damalige Kollegvorsteher selbst die Zustände. Die Bände lägen durcheinander da und seien „übel gehütet

...dass auf manchem Buch der staub zwei Finger dick ruhe und niemand wisse, welches das oberste oder unterste Theil der bibliothec bedeute“ (Schaab et al. 2003). 1816 wurde die Universität Erfurt geschlossen.

Erst 1837 kümmerte man sich wieder um die Amploniana. Damals waren von ihren 900 Handschriften – die ältesten stammen aus dem neunten Jahrhundert – bereits 45 vermodert (Debes 1989). 1994 wurde die Universität Erfurt neu gegründet und im Herbst 2002 übergab die Stadt Erfurt die Amploniana der Universität als Dauerleihgabe (ca. 40.000 Drucke aus der Zeit vor 1801 und ca. 1.000 Handschriften). Damit war eine Aufbewahrung nach modernen Standards möglich und überfällige Konservierungsarbeiten konnten endlich beginnen. Die benutzbaren Bände sind heute in einem Sonderlesesaal zugänglich (Universität Erfurt 2002).

Das zweite Beispiel stammt aus der Zeit der Säkularisation vor rund 200 Jahren. Die Überführung von Klostergut in Staatsbesitz (Säkularisation) wurde in Österreich ab 1770 flächendeckend durchgeführt, während Bayern, Württemberg und Baden erst mit dem Reichsdeputationshauptschluss ab 1803 systematisch begannen, Klosterbestände in staatliche Hand zu bringen. Die Einarbeitung der Bücherberge aus säkularisierten Klosterbibliotheken war überall eine große Herausforderung, personell und logistisch. In Bayern gab es einmal einen herben Rückschlag, und zwar in Amberg, wo für die Oberpfalz nach einem Dekret des Kurfürsten ab 1803 eine staatliche „Provinzial-Bibliothek“ aufzubauen war, was auch in den anderen Regionen des Landes geschah. Die Amberger Bibliotheksräume lagen im ehemaligen Kloster der Salesianerinnen. Schon 1809 waren mehr als 30.000 Bände für die systematische Aufstellung vorbereitet worden. Sie stammten aus aufgehobenen oberpfälzischen Klöstern, nämlich aus dem Jesuitenkloster Amberg, den Benediktinerklöstern Ens Dorf, Michelfeld, Reichenbach und Weißenhohe, dem Prämonstratenserkloster Speinshart sowie aus den Zisterzienserklöstern Walderbach und Waldsassen (mit dem berühmten Bibliothekssaal). Im Jahre 1815 brach nachts um 3 Uhr ein Brand aus, der einen Flügel des Bibliothekstrakts mitsamt der Galerie vernichtete. In einem zeitgenössischen Bericht lesen wir: 2Der Bibliothekar Joseph Moritz hat alle Welt aufgefordert, um den größten Schatz, den er kannte, in Sicherheit zu bringen: er selbst hat sich so angestrengt, daß er jetzt noch einem halbtoten Menschen gleichsieht. Und hätten nicht gute Freunde ihn hinweggerissen und fortgeführt, so wäre er wahrscheinlich mit sei-

nen Büchern verbrannt.“ Professoren und Studenten konnten zwar einen Teil der Bücher auf die Straße bringen, doch 16.532 Bände sind verbrannt (Lipp u. Gieß 1991).

Ein Bibliotheksbrand kann das geistige, intellektuelle und wissenschaftliche Leben einer Universität, einer Stadt – manchmal eines ganzen Landes – zum Erliegen bringen, was die unseligen Bücherverbrennungen im Dritten Reich als Vorspiel der Diktatur deutlich zeigten.

Die schlimmsten Zerstörungen ganzer Bibliotheken seit dem Altertum haben aber nicht nachlässige Pflege, sondern kriegerische Auseinandersetzungen verursacht. Buchbände stehen in einer Bibliothek eng an eng im Regal. Sie sind - als kompakter Papierblock - schwer entflammbar. Doch früher brannten meistens zuerst die hölzernen Einbauten und hölzernen Regale. Das Feuer griff dann auf die Bücher über und breitete sich über mehrere Bibliotheksräume aus. Aus einem Bibliotheksbrand von diesen Ausmaß war häufig fast nichts mehr zu retten. Es kam vor, dass in einem zerstörten Bibliotheksbau die Bücher tagelang, manchmal wochenlang, brannten. In weniger industrialisierten Ländern, die zu wenig für den Brandschutz tun können, besteht diese Gefahr heute noch. Gelang es früher aber, einen Brand mit Wasser zu löschen, dann kam man vom Regen in die Traufe. Denn nun entfaltete die Feuchtigkeit ihre zerstörerischen Kräfte. Die Bücher wurden durch das Löschwasser unbenutzbar. Die Seiten quollen auf und begannen zu schimmeln.

Erst kürzlich, am 2. September 2004, hat sich eine Brandkatastrophe in einem alten Bibliotheksgebäude ereignet. Ein Schmorbrand an der veralteten Elektroanlage entzündete den hölzernen Dachstuhl der Anna-Amalia-Bibliothek in Weimar, eines Denkmals aus dem Jahr 1766, das an Goethes Wohnhaus angrenzt und heute musealen Zwecken dient. Der darunterliegende Rokokosaal ist das Herzstück der berühmten, schon von Johann Wolfgang Goethe verwalteten Bibliothek zur deutschen Klassik. Er wurde schwer beschädigt. Leider lagerten im Rokokosaal noch größere Teile des historischen Bestands; sie hätten nur wenige Wochen später in einen modernen Bibliotheksbau umziehen sollen. Das Feuer in Weimar hat 50.000 ältere Bücher und die Musikaliensammlung zerstört. Durch Löschwasser wurden weitere 62.000 Bände beschädigt. Trotz rascher Gefriertrocknung lässt sich voraussichtlich nur ein Teil davon retten, denn die Restaurierungsarbeiten sind aufwendig.

Brandkatastrophen in Bibliotheken sind heute seltener geworden. Doch ihre Spur zieht sich seit der Antike durch die Geschichte. Die berühmtesten Bibliotheken der Antike sind die Bibliotheken von Pergamon, von Alexandria und von Ephesos (Casson 2002; Hoepfner 2002). Die Geschichte der Bibliothek des Museions in Alexandria ist zu einem häufig zitierten Beispiel für Kulturbarbarei geworden. Sie gilt als die erste Universalbibliothek der Menschheit und war seit dem 4. Jahrhundert vor Christi Geburt der Mittelpunkt der hellenistischen Wissenschaft und Kultur. Gelehrte aus dem ganzen Mittelmeerraum reisten nach Alexandria, um in dieser Bibliothek zu arbeiten. Die Bibliothek soll zweimal verbrannt sein. Die erste Katastrophe ereignete sich im Jahre 48 vor Christi Geburt, als Julius Cäsar die Flotte der Ägypter im Hafen der Stadt außer Gefecht setzen wollte. Der Brand geriet aber außer Kontrolle und die 700.000 Papyri, die Cäsar nach Rom bringen lassen wollte, mit dem gesammelten Wissen der Zeit verbrannten. Angeblich erhielt Königin Kleopatra damals zum Ausgleich von Rom 200.000 Papyri geschenkt, welche die Römer der Bibliothek von Pergamon weggenommen hatten.

Im Jahr 392 wurde die Schwesterbibliothek im Serapeion zu Alexandria verwüstet. 40.000 Schriftrollen sind damals verbrannt. Diese Bibliothek war im ptolemäischen Serapion-Tempel untergebracht, der laut Weisung des römischen Kaisers Theodosius als heidnische Kultstätte galt. Dieses Mal waren es fanatische Christen unter ihrem Patriarchen Theophilus, welche die Bibliothek zerstörten.

Den zweiten Brand der großen Bibliotheca Alexandrina sollen die Araber im Jahre 641 nach der Eroberung Alexandrias gelegt haben. Angeblich hatte Kalif Omar entschieden, die Werke müssten vernichtet werden, ob sie nun mit dem Koran übereinstimmten oder nicht. Mit den Werken der berühmten Bibliothek sollen die viertausend Badhäuser der Stadt Alexandria geheizt worden sein. Es heißt, diese Aktion habe sechs Monate lang gedauert. Heute bezweifeln Historiker allerdings die Glaubhaftigkeit der einzigen Quelle für diese Ereignisse. Denn der Chronist lebte 600 Jahre nach den angeblichen Ereignissen. Es kann sich um eine Wanderlegende handeln mit dem Ziel, die Araber als Barbaren zu diffamieren.

In der Gegenwart versucht man, die große Tradition der Bibliotheca Alexandrina wiederzubeleben. Der ägyptische Staat hat im Herbst 2002, als Ergebnis des Wiederaufbaus mit Hilfe der UNESCO seit dem Jahr 1987, in Alexandria die Neue Alexandri-

nische Bibliothek eröffnet. Ihre Architektur hat Aufsehen erregt. Ein kleiner Bestand an Sammlungen ist angeschafft worden. Er soll ausgebaut werden (Alexandria 2004).

Wir überspringen weitere Brandkatastrophen aus älterer Zeit - etwa bei der Einnahme Konstantinopels und im Gefolge des Dreißigjährigen Krieges - zugunsten einiger Beispiele aus der jüngeren und jüngsten Geschichte. Die Universität im belgischen Löwen/Louvain wurde 1435 gegründet. Ihre Universitätsbibliothek war die älteste Bibliothek Belgiens. Sie galt lange Zeit neben der von Paris als eine der besten Europas und war ein Zentrum der Humanismus-Forschung. Im 20. Jahrhundert hat diese Bibliothek eine neue, leider traurige Berühmtheit erlangt.

Beim Ausbruch des Ersten Weltkriegs besaß sie rund 300.000 Bände, außerdem rund 2.000 Inkunabeln und Handschriften. Der Bestand war gerade innerhalb des Hauses vollständig umgezogen worden, um der Forschung eine zeitgemäße Buchaufstellung anbieten zu können. Da besetzten die Deutschen im August 1914 kampflos die Stadt. Doch dann kam es zu Massakern der Deutschen und zu Aktionen französischer Widerstandskämpfer. Die Lage war äußerst gespannt. Als bei einer Schießerei mehrere deutsche Soldaten zu Tode gekommen waren, starteten die deutschen Besatzer die Vergeltungsaktion „Strafgericht über Löwen“. Die Einwohner wurden vertrieben, dann setzten die Deutschen die historische Innenstadt systematisch in Brand, rund 1.100 Wohnungen und eine Reihe öffentlicher Gebäude, auch an der Universität. Ein Advokat sah, wie gegen Mitternacht eine Tür zum Keller der Bibliothek aufgebrochen und Feuer gelegt wurde. „Mehrere Tage brannte die Bibliothek. Versuche, etwas zu retten, wurden durch die Gluthitze verhindert.“ (Schivelbusch 1988)

Der neubarocke Bau, innen zugleich Bibliothek, Museum und Kuriositätenkabinett, brannte vollständig aus. Eine Woche später schwelten noch Tausende von Büchern in der Glut, wie der Bibliotheksdirektor Paul Delannoy berichtete. „In den Straßen der verlassenen Innenstadt sah man plündernde Soldaten, und der Wind trieb die halbverbrannten Blätter der Bücher und Zeitschriften bis weit ins Land hinaus.“ (Schivelbusch 1988)

Die Londoner Times bezeichnete schon am 29. August 1914 die zerstörte Universität als „the Oxford of Belgium“. Die zerstörte Bibliothek eignete sich als Symbol für die deutsche Barbarei in Belgien. Die Gelehrten der Universität und der Bibliotheksdirektor übernahm-

men die Rolle von Anwälten ihrer Universität. „Als Minister, Botschafter, Sonderbotschafter, Gesandte und einfache Vortragsreisende schwärmten sie aus, die Weltöffentlichkeit von dem zu unterrichten, was ihrem Lande angetan worden war, und zur moralischen und materiellen Unterstützung Belgiens aufzurufen.“ (Schivelbusch 1988) Ihre Aktion führte unter anderem dazu, dass der Papst die Invasion Belgiens öffentlich verurteilte und dass der amerikanische Präsident Wilson die Ruine besuchte. Sie brachten auch eine internationale Hilfsaktion in Gang. Das gebildete Europa war fassungslos. Die Zerstörung der Universitätsbibliothek Löwen wurde als schlimmstes Verbrechen am menschlichen Geist seit dem Brand der Bibliothek von Alexandria gebrandmarkt. Nach dem Krieg hing jahrelang an der Ruine der Bibliothek ein Transparent mit der Aufschrift „Ici finit la culture allemande“. Deutschland beauftragte 1915 einen Bibliothekar aus Berlin, Fritz Milkau, eine Inspektionsreise durch Belgien durchzuführen, um weitere Kriegsschäden zu verhindern. Milkau erblickte in der Ruine betroffen die Papierasche. „Die älteste Bibliothek des Landes spurlos und für immer vom Erdbeben verschwunden ... in Rauch und Flammen aufgegangen, ohne etwas anderes zu hinterlassen als eine metertiefe Aschenschicht (...) Das ist kein belgischer Verlust mehr. Die ganze Welt ist dadurch ärmer geworden.“ (Schivelbusch 1988). Der Friedensvertrag der Alliierten von 1919 hat Deutschland in Art. 247 eigens verpflichtet, der Universität Löwen Bibliotheksgut „in gleicher Zahl und in gleichem Werte zu liefern, wie sie durch den von Deutschland an die Bibliothek von Löwen angelegten Brand zerstört wurden“ (Schivelbusch 1988). Den Buch- und Zeitschriftenbestand der Universitätsbibliothek Löwen hat eine deutsche Bibliothekskommission wieder aufgebaut. Das Gebäude wurde, vor allem mit amerikanischen Spenden, wiedererrichtet und im Juli 1928 feierlich eingeweiht.

Aber am 17. Mai 1940 rückten die Deutschen erneut in Löwen ein. Das historische Zentrum Löwens blieb unversehrt. Allein die Universitätsbibliothek wurde mehrmals von Bomben getroffen und das Gebäude brannte wieder vollständig ab. Denn es stand kein Löschwasser zur Verfügung, weil die städtische Wasserversorgung zerstört war. Ein Augenzeuge berichtete: „Zwei Tage lang stieg Rauch aus der Bibliothek auf“ (Schivelbusch 1988, S.175). Diese neue Katastrophe von Löwen haben zwischen 1,5 Prozent und zwei Prozent von insgesamt 900.000 Bänden überstanden. Die deutsche Politik versuchte sofort, die Schuld auf England zu lenken, jedoch ohne Er-

folg. In Löwen sind 1940 Bücher und Zeitschriften im Wert von elf bis zwölf Millionen Reichsmark verbrannt.

Zuvor schon hatten sich die Nationalsozialisten, kurz nach der Machtergreifung, sich an den Büchern vergreifen. In den vom Nationalsozialistischen Deutschen Studentenbund organisierten „Bücherverbrennungen“ gingen am 10. Mai 1933 in vielen deutschen Universitätsstädten zahlreiche Bücher in Flammen auf: Bücher „pazifistischen“ oder „kommunistischen“ Inhalts. Viele der Autoren, deren Bücher bei den Aktionen verbrannten, wurden später verfolgt, ermordet oder ins Exil getrieben.

Das Feuer kehrte zurück: In Deutschland selbst erlitten die Bibliotheken beim Bombardement der Alliierten, dem Gegenschlag gegen die Kriegsgreuel deutscher Soldaten unter Hitler, die schwersten Schäden in ihrer Geschichte. Ein Zeitgenosse stellte fest: „Es ist eine Katastrophe, die in der Geschichte der Bibliotheken und in der Geschichte der Wissenschaften keinen Vergleich hat“ (Leyh 1947). Zu den schlimmsten Kriegsschäden dieser Zeit in einer Bibliothek in Deutschland gehörten die Folgen von Luftangriffen auf Hamburg bei der „Operation Gomorrha“. Zwischen dem 24. Juli und dem 3. August 1943 wurde dieser größte Luftangriff alliierter Truppen gegen eine deutsche Stadt geflogen. 791 Bomber waren im Einsatz. Hamburg wurde zur Geisterstadt gebombt und völlig verwüstet. Von der Bibliothek der Freien und Hansestadt Hamburg (heute Staats- und Universitätsbibliothek Hamburg) am Speersort stand am Ende nicht mehr als eine einzige Wand. 700.000 Bände von insgesamt 850.000 Bänden der Bibliothek im Wert von rund 27 Millionen Reichsmark sind damals verbrannt. Doch die wertvollen alten Drucke und die Handschriften waren seit 1942 ausgelagert worden und überstanden die Katastrophe. Die benachbarte Commerzbibliothek Hamburg beklagte den Verlust von 160.000 der 174.000 Bände (SUB Hamburg 1994; Garber 1994).

Die Bayerische Staatsbibliothek in München verlor ihr prächtiges klassizistisches Gebäude von 1839. In der Nacht vom 9. auf den 10. März 1943 wurden Phosphorbomben auf die Staatsbibliothek abgeworfen. Allein bei diesem Luftangriff sollen 400.000 Bände, rund 20 Prozent des Bestandes, zerstört worden sein. „Ein Augenzeuge berichtete, dass der Feuersturm angekohlte Bücherseiten hochschleuderte und sie dann 6 bis 7 Kilometer weit in den Münchner Osten fortgetragen wurden.“ (Dressler 2000)





Abb. 1: Bayerische Staatsbibliothek: Verkohlte Folianten. Brandschaden aus Bombeneinschlägen am 10. März 1943 (Halm 1949).

Weitere Bombeneinschläge in der Staatsbibliothek folgten. 1945 waren nur noch zwei Bibliotheksräume benutzbar (Dressler 2000). Im Jahr 1946, kurz nach Kriegsende, als „in vielen Städten noch nicht einmal das Problem der Schuttabräumung gelöst ist“ (Leyh 1947), wurden rund 80 große deutsche Bibliotheken um eine Zusammenstellung ihrer Kriegsschäden gebeten, die der Tübinger Bibliotheksdirektor Georg Leyh 1947 publizierte. Seine Zusammenfassung der Quellen ergibt folgendes Bild: Die Bibliotheksgebäude waren teilweise, in einigen Fällen ganz zerbombt, die 1946 gemeldeten Schäden am Bibliotheksbestand waren immens. Völlig zerstört wurden die Landesbibliothek Karlsruhe, die Stadtbibliotheken Leipzig und Essen sowie die Bibliothek des Reichstags in Berlin. Georg Leyh schätzte 1957, die wissenschaftlichen Bibliotheken in Deutschland hätten im 2. Weltkrieg insgesamt 75 Millionen Bände verloren (Leyh 1957). Die meisten dieser Bände sind zu Aschenstaub verbrannt.

Leider setzen kriegsrische Anschläge auf bedeutende Bibliotheken sich bis in die Gegenwart fort. Im Jahr 1993 ist im Krieg zwischen Serbien und Bosnien die Nationalbibliothek von Sarajewo völlig zerstört worden. Im April 2003 wurde die Nationalbibliothek von Bagdad durch den gezielten Einsatz von Brandbeschleunigern, die Temperaturen bis zu 3.000 Grad Celsius erzeugen, zerstört. Unter dem



Titel „Das eingeäscherte Gedächtnis“ berichtete Werner Bloch in der Neuen Züricher Zeitung: „30 Prozent der Bücher verbrannten zu Asche. (...) Warum wurden selbst die Rückstände der Bücher akribisch verbrannt?“ Der Brand war das Ergebnis „eine(r) scheinbar irrationale(n) Zerstörungswut, die doch genau geplant und orchestriert war“. Die Brandstifter sind nicht gefunden worden. Aus dem Feuer konnten Iraker 300.000 Bände retten. Immerhin waren die Handschriften, die wertvollste Bestandsgruppe, bereits vor dem Brand ausgelagert worden (Bloch 2003).

Auf seiner Reise im Auftrag der UNESCO erblickte der französische Bibliothekar Jean-Marie Arnoult 2003 in der ehemaligen Bibliothek von Basra im Irak statt Büchern nur noch „verrußte, geschwärzte Räume, durch die man knietief in weisser Asche wadet“ (Arnoult 2003).

### **„BESTÄUBT VON SEINEN BÜCHERN“ - EIN ZÄHLEBIGES KLISCHEE**

Gelehrte mussten auch in früheren Jahrhunderten viel lesen. Gute Kenntnisse der einschlägigen Arbeiten waren die Voraussetzung für eigene publizistische Arbeit der Wissenschaftler. Eine treffende Definition dessen, was früher Gelehrsamkeit hieß, verdanken wir dem Schriftsteller Gotthold Ephraim Lessing, der auch die Bedeutung der Lektüre für das wissenschaftliche Arbeiten betont: „Der aus Büchern erworbene Reichthum fremder Erfahrung heisst Gelehrsamkeit.“ (Deutsches Wörterbuch 1897) Folgerichtig definierte das Deutsche Wörterbuch der Brüder Grimm „Gelehrsamkeit“ im Jahr 1897 mit den Worten, der Gelehrte habe „seinen Mittelpunkt (...) in der Bücherwelt“ (Deutsches Wörterbuch 1897; Fabian 1977).

Der Gelehrte war über Jahrhunderte hinweg auch eine Zielscheibe für Spott und Satire. Er wurde zur Karikatur verzeichnet und als Pedant, als Stubenhocker, als Menschenfeind und Narr dargestellt. In der belletristischen Literatur gibt es das Motiv vom verkleideten Affen, der erfolgreich als Gelehrter auftritt. Er tut nichts als lesen und schreiben, er denkt wenig und aus zehn Büchern schreibt er ein elftes zusammen (Kosenina 2003). Dieses Klischee lässt sich aus der Entwicklungsgeschichte der Wissenschaft verstehen. Im 17. Jahrhundert verbreitete sich der Forschertyp der Polyhistor. Die Berufstätigkeit dieses Gelehrten bestand darin, sich rasch in inhaltlich unterschiedlichste wissenschaftliche Disziplinen einzuarbeiten, die Lesefrüchte in dickleibigen Werken zusammenzustellen und mit eigenen Überlegungen anzureichern. Er sollte die Mitwelt auf den neuesten Stand

der Dinge bringen. Weil nur ganz wenige Polyhistoren in die Wissenschaftsfächer tiefer eindringen, übten Fachgelehrte heftige Kritik an der fehlenden fachlichen Kompetenz und der reinen Büchergelehrsamkeit: Bei Polyhistoren vermisste man jede lebendige Forschung und Lehre und sie brächten durch ihre Oberflächlichkeit die Wissenschaften in Verruf. Der Polyhistor wurde in der öffentlichen Meinung als Schnell- und Vielschreiber betrachtet.

Besonders unbeliebt war der Typ des reinen Kompilators, der in seinen Werken fremde Meinungen referierte, ohne eine eigene Meinung zu haben. Auf ihn trifft ein satirischer Satz des Dichters Jean Paul über den Gelehrtenstand zu: „Der Staub der Folianten ist seine Narung.“ (Jean Paul 1974) Hier ist nicht mehr von Papierstaub im Wortsinn die Rede. Jean Paul nimmt den Oberflächenstaub als pars pro toto. Verstaubt sind nicht nur die Bücher, sondern auch deren Inhalt. „Staub der Folianten“ ist eine Metapher für verstaubtes, totes, unnützes Wissen. Folgerichtig wird der Kompilator, der sich solchen Staub anstelle echten Wissens einverleibt, zur Spottfigur.

Man greift in dieser Zeit auch auf Albrecht Dürers bekannten Holzschnitt des Büchernarren zurück, der zuerst in Sebastian Brants Satire „Das Narrenschiff“ (1494) gedruckt wurde. Als Büchernarr wird nun der zeitgenössische Gelehrte vorgestellt (Abb. 2). Er sammelt zu viele Bücher und kann die meisten davon niemals lesen.

Die satirische Darstellung, ein Kupferstich von 1710, zeigt einen Gelehrten in mönchsähnlicher Kleidung mit Narrenkappe inmitten einer riesigen Bibliothek. Die Regale sind voll, deshalb stapeln sich die Werke in einem großen Durcheinander am Boden. Laut subscriptio kauft er so viele Bücher, dass seine Zeit nur zum Abstauben derselben reicht. Der Gelehrte hat eine Schürze vorgebunden und klagt „daß ich nichts als den Staub abkehre“, während er einen verschlossenen Folianten mit dem Handbesen vom Staub befreit (Weigel 1710). Solche Darstellungen warnten vor einem Übel, das jedem wissenschaftlich Tätigen drohte, der ein intensives Bücherstudium leisten musste. Die Absicht war Besserung. Der Leser dürfe es nicht so weit kommen lassen. Ein Gelehrter, der sich nicht lächerlich machen wolle, dürfe sich nicht mit oberflächlichem Anlesen und auch nicht mit dem bloßen Studieren von Büchern begnügen. Er müsse auch andere Formen des Wissenserwerbs nützen; er müsse seine Studierstube, die ihn gegen die Umwelt abschirme, verlassen und regelmäßig unter Menschen gehen.

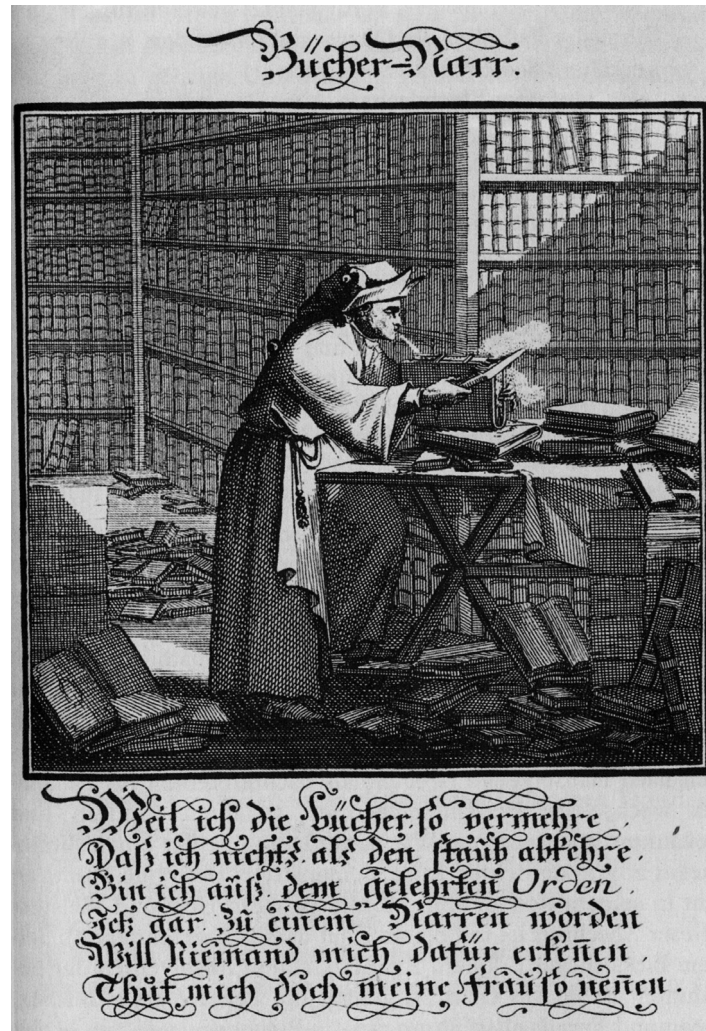


Abb. 2: Der Bücher-Narr, Kupferstich von Johann Christoph Weigel, um 1710.

Das ist noch zu Beginn des 19. Jahrhunderts ein wichtiges Thema in Goethes Drama „Faust“ (Erster Teil, 1808), das unser Klischee wieder aufgreift. Der in vielen Disziplinen bewanderte Doktor Faust, als Gelehrter und Alchemist eine Figur aus dem 16. Jahrhundert, steht in der ersten Szene – die Bühnenanweisung lautet „Nacht“ – in seinem Studierzimmer, umgeben von Büchern und von den Gerätschaften einer Alchemistenküche. In unserem

Zusammenhang ist Fausts berühmter Monolog wichtig, denn Goethe arbeitet den Gegensatz von verstaubtem Bücherverlies und lebendiger Natur heraus.

*„Weh! Steck ich in dem Keller noch?  
Verfluchtes dumpfes Mauerloch,  
Wo selbst das liebe Himmelslicht  
Trüb durch gemalte Scheiben bricht!  
Beschränkt von diesem Bücherhauf,  
Den Würme nagen, Staub bedeckt,  
Den bis ans hohe Gewölb hinauf  
Ein angeraucht Papier umsteckt;  
(...)  
Statt der lebendigen Natur,  
Da Gott die Menschen schuf hinein,  
Umgibt in Rauch und Moder nur  
Dich Tiergeripp und Totenbein!  
Flieh! Auf! hinaus ins weite Land!  
(...)  
Den Göttern gleich ich nicht! zu tief ist es gefühlt!  
Dem Wurme gleich ich, der den Staub durchwühlt,  
Den, wie er sich im Staube nährend lebt,  
Des Wandrers Tritt vernichtet und begräbt!  
  
Ist es nicht Staub, was diese hohe Wand  
Aus hundert Fächern mir verenget?  
Der Trödel, der mit tausendfachem Tand  
In dieser Mottenwelt mich dränget?“  
(Johann Wolfgang von Goethe)*

Das nächtliche Gelehrtenverlies, das Faust in den denkbar düstersten Farben schildert, ist der Ausgangspunkt für einen Erkenntnisprozess, der weit darüber hinaus und bis ins Metaphysische ausgreift. Goethe bedient sich der seit dem Barock wieder häufig zitierten Redewendung aus der Bibel, wonach der Mensch aus Staub geschaffen sei und nach dem Tod wieder zu Staub zerfallen werde. Im Buch des Predigers Salomo heißt es in der Übersetzung von Martin Luther: „Denn es ist alles eitel. Es feret alles an einen ort / Es ist alles von staub gemacht / und wird wider zu staub.“ (Biblia 1545)

Staub, Moder und Finsternis regen Faust an, sein Dasein im Staub als quasi animalisch (staubfressender Wurm), also menschenunwürdig, zu erkennen. Ein langes Leben als Wissenschaftler hat ihn vom Zweck der Schöpfung, in und mit der Natur zu leben, weit entfernt. Folgerichtig setzt Goethe der Misere Fausts ein positives Wunschbild entgegen: die freie Natur und deren belebende Wachstumskräfte.

Die philosophische Zuspitzung des Spotts über den Stubengelehrten bei Goethe macht es nötig, ergänzend an den Kontext dieses Berufs in der frühen Neuzeit zu erinnern. An den Universitäten wurde bis ins 17. Jahrhundert weitgehend kanonisiertes Wissen gelehrt. Studenten benötigten dafür keine umfangreiche öffentliche Bibliothek. Der Gelehrte hatte meistens zuhause eine Privatbibliothek mit Werken für seine Studien. Sofern Naturforschung betrieben wurde, kam noch eine entsprechende Laborausrüstung dazu. Wer aber in der frühen Neuzeit lange Zeit mit unverständlichen Studien zuhause verbrachte und dort vielleicht auch noch gefährliche Experimente anstellte, konnte für die Mitmenschen leicht zum Objekt des Anstoßes werden. Auch der verbreitete Aberglaube trug dazu bei, Wissenschaftler in Verruf zu bringen. So gesehen ist die Kritik an Staub und Moderdasein des Stubengelehrten zugleich Kritik an einer fehlenden Öffentlichkeit von Wissenschaft. Diese Öffentlichkeit entwickelte sich in Deutschland erst im Zuge der Aufklärung. Damals wurden Universitätsbibliotheken mit stattlichen Beständen öffentlich, das heißt, ihre Benutzung war nun allen Gelehrten gestattet. Den Grundstock für ihre reichen Bestände bildeten gelehrte Bibliotheken säkularisierter Kloster und umfangreiche Privatbibliotheken von zeitgenössischen Gelehrten.

Doch das einseitige Bild vom Gelehrten, der im Kampf mit dem Bücherstaub liegt, wirkte weiter. Für die bildende Kunst sei auf das bekannte Gemälde „Der Bücherwurm“ von Carl Spitzweg (um 1850) hingewiesen. Da steht ein kurzsichtiger älterer Gelehrter, vermutlich in einer Adelsbibliothek, oben auf der Bücherleiter vor der Regalwand Metaphysik und schaut in ein Buch. Ein weiteres Buch hat er unter den Arm geklemmt, ein drittes und viertes stecken zwischen den Knien. Aus seiner Rocktasche hängt ein großes Tuch nach hinten, vermutlich Staubtuch und Schnupftuch in einem. Ein Staubtuch gehörte seinerzeit wohl zum Handwerkszeug des Bibliothekars. In der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts erscheint das Motiv in variierten Form als Kupferstich von Christian Glassbach. Rechts und links von

der porträtierten Figur stehen nun Bücher, die von Spinnweben überzogen sind. Die Bildunterschrift lautet nun bezeichnenderweise: „Das Bildnis eines durch und durch Gelehrten.“ (Glassbach 1748)

Zwar taucht der Bücherstaub in der offiziellen Bibliothekshistorie nicht als Thema auf. Doch in versteckten Quellen machten Bibliothekare gelegentlich verstaubte Zustände namhaft. So berichtete z.B. Heinrich Josef Wetzer 1850, als er zum zweiten Mal das Amt des Oberbibliothekars der Universitätsbibliothek übernahm, über Zustände, welche er zu beseitigen gedachte. In dem amtlichen Schreiben heißt es: „man braucht nur ein Buch aufzuschlagen, das längere Zeit nicht benutzt wurde, und man wird sogleich durch einen unangenehmen Geruch zum Nießen veranlaßt, welcher sogar für die Augen und die Brust recht schädlich ist“ (Schmidt 1979). Gegen dieses Problem könnte man auf einen Vorschlag des deutschen Dichters Jean Paul zurückgreifen. Er hatte schon in seinem Roman „Titan“ (1800-1803) empfohlen, Bibliothekare sollten bei der Arbeit Schutzkleidung gegen Bücherstaub tragen, und zwar „Hantirages Maske mit Glasaugen und blechnen Luftröhren (...), für Bibliothekare gegen das Einziehen des Bücherstaubs gemacht“ (Jean Paul 1933).

Der Spott über den Büchergelehrten und der Spott über den Bibliothekar früherer Jahrhunderte kommen in der Sache letztlich zusammen. Denn der Bibliothekar war damals Gelehrter: An Universitäten war bis zum Ende des 19. Jahrhunderts ein Professor der Universität für deren Bibliothek(en) verantwortlich. Er erhielt keine Fachausbildung dafür. Viele dieser Professorenbibliothekare konnten oder wollten neben Forschung und Lehre nur wenig Zeit erübrigen. Es hing aber vor allem vom Engagement des Amtsinhabers ab, ob die Bibliothek gut verwaltet wurde. Fehlendes Engagement in Bibliotheksfragen führte zur Verödung des Bibliotheksbetriebs. In seiner Schrift „Über öffentliche Bibliotheken, besonders deutsche Universitätsbibliotheken und Vorschläge zu einer zweckmäßigen Einrichtung derselben“ karikierte der Bibliothekar Friedrich Adolf Ebert, der kurz darauf die Leitung der Königlichen Bibliothek in Dresden (heute Sächsische Landes- und Universitätsbibliothek Dresden) übernahm, die Lage wissenschaftlicher Bibliotheken um 1810: „Was sind die mehrsten unserer akademischen Bibliotheken? Staubige, öde und unbesuchte Säle, in denen sich der Bibliothekar von Amts wegen aufhalten muss, um diese Zeit über allein zu sein. Nichts unterbricht die tiefe Stille als hie und da das traurige Nagen eines Bücherwurms.“ (Ebert 1990)



In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts verfügten einige Universitäten bereits über einen Wissenschaftler, welcher die Bibliotheksleitung hauptamtlich ausübte. Aber erst nach dem gewaltigen Ausbau der Universitäten im deutschen Kaiserreich kam es zu grundsätzlichen Neuerungen. In Preußen trat 1893 der erste Erlass über eine Fachausbildung zum wissenschaftlichen Bibliotheksdienst in Kraft. Andere deutsche Länder schlossen sich an. Bis zum Ersten Weltkrieg stieg die Wissenschaft in Deutschland bekanntlich zu internationalem Ruhm auf. Professionell ausgebildete, hauptamtliche Bibliothekare, welche die Universitätsprofessoren laufend mit aktueller Fachliteratur versorgten, hatten daran keinen geringen Anteil.

### **MIT LAPPEN UND STAUBSAUGER: STAUBSCHUTZ FÜR BÜCHER**

Staub, der sich an einem Buch anlagert oder gar innen zwischen die Seiten eindringt, gilt als natürlicher Feind des Buchbesitzers und des Lesers. Er kann wie der Schmutz schlimmste Schäden anrichten. Einige Beispiele haben wir gesehen.

Wegen ihres Wertes wurden hochwertige Bücher, etwa von Hand geschriebene und ausgemalte Werke oder für den Gottesdienst bestimmte Werke wie großformatige Bibeln und Gesangsbücher, schon immer vor Staub geschützt. Doch haben Buchbesitzer im Lauf der Jahrhunderte zunehmend verlangt, auch die im Alltag verwendeten Bücher vor Schmutz und Staub zu bewahren. Wer heute ein gebundenes Buch sieht, hat in der Regel von dieser langen Entwicklung keine Kenntnis. Deshalb sei an einige ihrer Stationen erinnert.

Bis ins 18. Jahrhundert war es üblich, dass Buchhändler auf Handelsmessen die Bücher nicht gebunden verkauften. Sie verkauften nur das Innere, den Buchblock. Die Werke verpackte der Buchhändler in Fässer oder Ballen, um sie beim Transport vor Staub, Schmutz und Nässe zu schützen. Der Kunde kaufte es in diesem Zustand, suchte dann den Buchbinder auf und ließ für sein Exemplar einen Einband anfertigen. Der so genannte Schmutztitel an Büchern ist ein Blatt mit einer gekürzten Titelfassung. Wie der Name sagt, hat er auch die Funktion, die Außenseiten des ungebundenen Buches, vor allem das Haupttitelblatt, während der Lagerung von Staub und Dreck frei zu halten. Das so genannte Vorsatzpapier, das am Innendeckel des Einbands vor dem Titelblatt zusätzlich eingefügt sein kann, hat eine stabilisierende Funktion für den Einband, daneben aber ebenfalls eine Schutzfunktion.

Schließlich ist der Bucheinband selbst eine Erfindung, die das Buch u.a. vor Staub schützt. Die Qualitätsanforderungen an Buchbindereinbände verlangen, dass sich bei einem gebundenen Buch, wenn man es aufstellt oder hinlegt, die Seiten nicht öffnen dürfen. Wertvolle Bände erhielten früher eigene Schließen für den Buchblock, die am Einbanddeckel befestigt waren. Im geschlossenen Zustand wurden die Seiten aufeinander gepresst, damit Schmutz und Staub nicht eindringen konnte.

Am Einband bieten die obere und die untere Einbanddecke Schutz vor Staub. Früher verwendete man feste Buchdeckel aus Holz und Leder; heute nimmt man für stabile Einbände eine feste Pappe, die mit Leinen, mit einem Kunstgewebe oder mit Leder überzogen wird. Eine Schwachstelle am Einband liegt am Buchrücken. Er muss relativ eng am Buchblock anliegen, denn sonst kann Staub von oben eindringen. Das gelegentlich verwendete farbige Band am oberen Rücken des Bucheinbands (Kapitalband) dagegen hat keine schützende, sondern eine schmückende Funktion.

Auch das gebundene Buch ist als ganzes vor Staub zu schützen. In früheren Jahrhunderten schützten Privatleute, wenn sie auf Reisen gingen, ihr Buch durch einen Beutel (es gibt eine eigene Buchgattung „Beutelbuch“) oder ein Futteral. Da feste Einbände aufwendig gefertigt werden und – zumindest bis zum Kauf des Werkes beim Buchhändler – sauber bleiben müssen, versieht man das gebundene Buch heute zusätzlich mit einem Schutzumschlag. Er besitzt in der Regel eine Schutzschicht gegen Feuchtigkeit. Er dient auch als wichtiger Werbeträger. Wenn heute ein Verlag ein hochwertiges Buch besonders schützen möchte, lässt er eigens einen Schubert aus fester Pappe dafür anfertigen. Wir finden Schubert vor allem bei hochwertigen Kunstbänden, bei Lexika, Atlanten und großen Formaten.

In den riesigen Büchermagazinen der größeren Bibliotheken in Europa wird man heute selten Bestände antreffen, auf denen dicker Staub liegt. In industriell höher entwickelten Ländern sind die Magazine gut belüftet oder sogar mit einer Klimaanlage ausgestattet, die für gleich bleibende Temperatur- und Feuchtigkeitswerte sorgt. Da in diesen Magazinen Mitarbeiter regelmäßig tätig sind, verlangen auch die Arbeitsschutzbedingungen, dass keine Staubbelastung eintritt – ganz zu schweigen von extrem gesundheitsgefährdenden Ablagerungen wie mikrobiell belastetem Staub, z.B.



Schimmel oder Asbeststaub aus defekten Isolierungen. In Deutschland sind die Bestimmungen der Arbeitsstättenverordnung und der DIN-Normen maßgeblich (Neuheuser 2002).

Wird doch einmal ein staubiger Band im Magazin ausgehoben, dann saugt heute ein Mitarbeiter vor der Benutzung die Staubschicht ab und wischt mit einem trockenen Lappen über die Umschlagflächen.

Das neueste Produkt auf dem Markt ist DEPULVERA, eine 2003 in Italien speziell für Bibliotheken entwickelte automatisierte Entstaubungsmaschine. Sie besteht aus einer fahrbaren Apparatur für kleinere und mittelgroße Formate. Das Buch läuft auf einem Förderband durch die Maschine und wird dabei von allen Seiten abgebürstet. Gleichzeitig ist ein Hochleistungsstaubsauger zugeschaltet. DEPULVERA ist direkt neben dem Bücherregal einsetzbar. Das patentierte System arbeitet mit einer Technologie, die das Buch schont. Pro Minute werden zwölf Bände entstaubt (DEPULVERA).

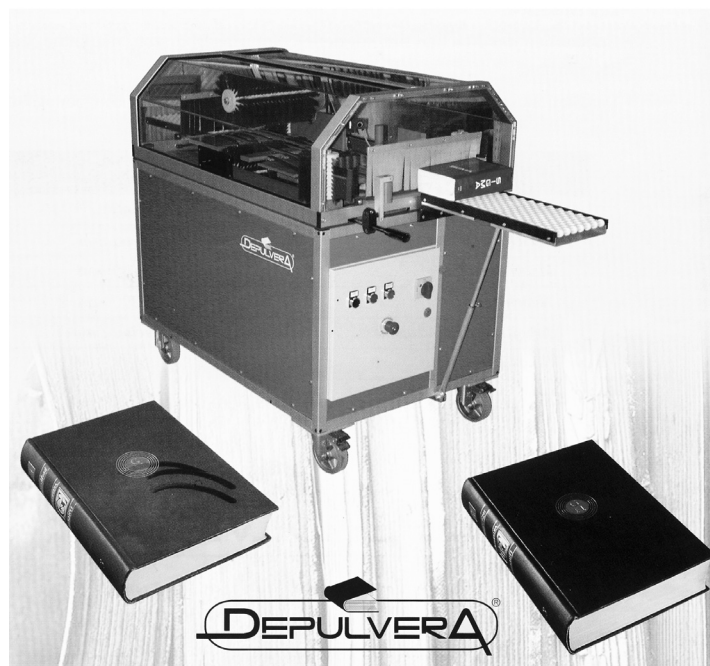


Abb. 3: Die Entstaubungsmaschine DEPULVERA.

Für eine Beurteilung – etwa im Vergleich mit einer herkömmlichen Reinigung mittels Staubsauger und Lappen – liegt noch kein Anwenderbericht vor.

### **ZERBRÖSELNDE BÜCHER – DER KAMPF GEGEN DEN ZERFALL**

Seit den Achtziger Jahren des 20. Jahrhunderts kämpfen Bibliotheken verstärkt mit einem weiteren Problem, das zum Abschluss kurz skizziert sei. Um das Jahr 1840 herum kam die traditionelle Buchherstellung aus Hadern und Lumpen an ihr Ende. Im Zuge der Industrialisierung des Buchdrucks wurden nun riesige Mengen an rasch nachwachsenden Rohstoffen benötigt. Hierfür kam Holzschliff zum Einsatz. Ganze Wälder von Fichten, Tannen und Kiefern werden seitdem angepflanzt, um die Holzfasern der Baumstämme zu schleifen und sie als Papierbrei der Produktion zuzuführen. Das Papier wurde außerdem mit säurehaltigem Harz geleimt.

Leider verursachen die sauren Substanzen langsam den chemischen Verfall des Papiers. Es verfärbt sich, wird dann brüchig und zerbröselt zuletzt. Etwa 97 Prozent aller Papiere, die zwischen 1850 und 1950 hergestellt wurden, sollen „sauer hergestellt“ worden sein. Erste Analysen durch William J. Barrow in den USA ergaben schon 1957 einen Befund von alarmierenden Ausmaßen: „Es erscheint wahrscheinlich, dass die meisten Bücher aus Bibliotheksbeständen, die in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts gedruckt wurden, im nächsten Jahrhundert nicht mehr benutzbar sein werden.“ (Barrow 1959; Barrow Institute 1967)

Untersuchungen in der Library of Congress in Washington und in den Universitätsbibliotheken von Stanford und Yale kamen 1979-1984 zu dem Ergebnis, dass nahezu ein Viertel des gesamten Bestandes dieses Zeitraums so brüchig war, dass die Bände bald unbenutzbar sein würden. In Yale hatte man im Test pro Band eine Seite an einer Ecke umgeknickt. An 37 Prozent der Bände brach das Papier ab. Bei der Library of Congress waren es 25 Prozent. Rasch wurden Arbeitsgruppen gegründet, Gelder beantragt und Konferenzen abgehalten. Die 1983 in den USA gegründete Commission on Preservation and Access ließ 1986 den Film „Slow Fires“ über das langsame Sterben der Bücher drehen, der vielerorts Bewusstsein für die Probleme weckte. Auch engagierten sich zunehmend Wissenschaftler für Maßnahmen zur Erhaltung der Bestände, etwa der Kunsthistoriker Larry Silver: „Es ist schwer, den

Horror zu vermitteln, der einen überfällt, wenn man eine bedeutende Zeitschrift um 1890 zur Hand nimmt (...) nur um zu sehen, wie die Seite beim aufmerksamen Studieren in der Hand buchstäblich zerbröseln, zu winzigen staubigen Partikelchen. Und dabei zu wissen, man ist der Letzte, der den Artikel in der Bibliothek zu Gesicht bekam, für immer.“ (Silver 1990)

Für Westdeutschland legte das Deutsche Bibliotheksinstitut in Berlin 1989 die erste – und bisher einzige – Schadensbilanz vor. Sie kam zu dem Ergebnis, dass 38 Prozent des gesamten Bibliotheksbestands (das entspricht 58 Millionen Bänden) mehr oder weniger vergilbt oder bereits brüchig waren (Usemann-Keller 1989).

Dieses Problem wird Büchersammlern und Bibliotheken weltweit noch lange zu schaffen machen, auch wenn der Erhaltungszustand von Exemplar zu Exemplar schwankt und der Zerfall in vielen Fällen nicht so rasch fortschreitet wie befürchtet. Bisher wurden vier Wege beschritten, um zu verhindern, dass die mit „saurem“ Papier hergestellten Werke nicht mehr lesbar sind oder gar zerbröseln.

*Erstens* hat die Papierindustrie sich nach langem Ringen bewegen lassen, hochwertigere Bücher, etwa wissenschaftliche Abhandlungen, zunehmend auf säurefreiem Papier zu drucken und damit das Problem des Papierzerfalls an seiner Wurzel zu packen. Es gelang, die Qualitätsanforderungen, etwa für den ph-Bereich und das Einbringen einer alkalischen Reserve, in einer internationalen Norm für „permanent paper“ festzuschreiben (ISO 7606).

Wenn bei der Buchherstellung die Norm für dauerhaftes Papier angewendet wurde, dann weist jedes Exemplar der Auflage im Impressum – meistens auf der Rückseite des Titelblatts – das Unendlich-Zeichen als Eindruck auf.

*Zweitens* haben betroffene Bibliotheken in Deutschland zunächst Initiativen in den Bundesländern gestartet und 2001 eine bundesweite „Allianz zur Erhaltung von schriftlichem Kulturgut“ gegründet, um durch intensive Öffentlichkeitsarbeit den „schleichenden Tod“ von wertvollem Kulturgut bewusst zu machen und die notwendigen Maßnahmen untereinander abzustimmen. Denn wegen der hohen Kosten kann nicht jede Bibliothek all ihre gefährdeten Bände vor dem Zerbröseln bewahren. Man will aber dafür sorgen, dass von jedem Werk ein Exemplar für die Nachwelt nutzbar bleibt.

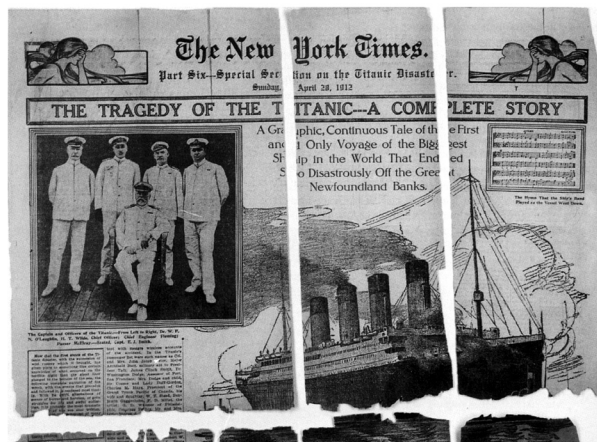


Abb. 4: The New York Times, 1912. Papier durch Säureeinfluss gebräunt und abgebröckelt.

*Drittens* ist eine neue Technologie zur „Entsäuerung“ von Büchern in einem Massenverfahren entwickelt worden. Die Deutsche Bibliothek (Frankfurt/M. und Leipzig) als Nationalbibliothek für Werke seit dem Jahr 1913 hat 1987, mit Unterstützung des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, begonnen, gemeinsam mit der Firma Battelle eine Anlage zu entwickeln, in der durch Wässern und durch den Einsatz von Kalzium- und Magnesiumkarbonat eine stabile chemische Situation im Papier erzeugt wird. Hunderttausende von Bänden aus dieser Bibliothek wurden vom beauftragten Dienstleister, dem Zentrum für Bucherhaltung in Leipzig, bis heute entsäuert. Allerdings eignet die Anlage sich nur für einen Teil der gefährdeten Werke (keine Großformate, keine Kunstdrucke, keine wertvollen Bücher).

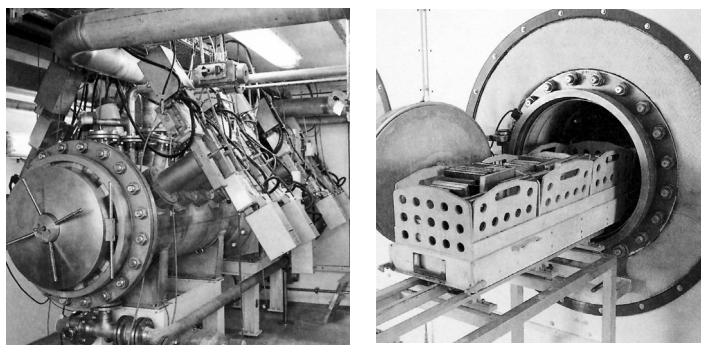


Abb. 5 u. 6: Anlage zur Massenentsäuerung nach dem Battelle-Verfahren in Leipzig.

Später folgten andere Technologien. Das zur Zeit modernste Flüssigphasen-Entsäuerungsverfahren ist der CSC BookSaver-Prozess. Er kommt ohne Wässerung aus, arbeitet im Tieftemperaturbereich und greift daher das Buch weniger stark an. Ein erst kürzlich gegründetes Unternehmen zur Bestandserhaltung, die Preservation Academy Leipzig, hat ihn 2003 in Deutschland eingeführt (Zeeb 2004).

*Viertens* muss man leider feststellen, dass es für viele der „brittle books“, wie man sie in den USA nennt, schon zu spät ist. Sie sind bereits am Zerfallen; die Seiten brechen beim Knicktest ab. 18 Millionen Bände waren 1989 in Westdeutschland betroffen. In diesen Fällen hilft in der Regel nur noch der Wechsel auf ein anderes Medium, denn nur bei wertvollen Stücken kommt die aufwendige konservatorische Einzelbehandlung jedes Blattes in Frage. Daher verfilmt man zerfallende Bücher auf Mikrofilm. Für diese Schutzverfilmungen existiert eine erprobte DIN-Norm, die auch auf die langfristige Haltbarkeit abzielt. Mehr und mehr kommen seit 1993 auch Hybridverfahren zum Einsatz, bei denen das Werk in einem Arbeitsgang für die Verfilmung und Digitalisierung eingescannt wird. Die digitalisierte Version kann dann im Internet angeboten werden. Allerdings gibt es für digitalisierte Bücher und Zeitschriften noch keine Standards für den langfristigen Zugriff. Das zerfallende Exemplar des Originals wird man noch für einige Benutzungsfälle bereithalten, wenn es nicht schon so stark zerstört ist, dass es im Anschluss an die Digitalisierung aus dem Bibliotheksgut ausgeschieden wird.

Niemand sollte annehmen, mit der Analyse der Schäden und mit den geschilderten Entwicklungsschritten sei das Problem des Papierzerfalls erkannt, gebannt und von der Tagesordnung verschwunden. Es wird bleiben. Denn bei der Erhaltung von zerfallenden Beständen gibt es noch andere Schwierigkeiten. Vor allem können sich die allermeisten Bibliotheken und deren Träger die Finanzierung der notwendigen Maßnahmen nicht leisten. Daher werden in Deutschland auch in Zukunft Hunderttausende älterer Bände pro Jahr unbenutzbar werden und später zu Staub zerbröseln.

Vielleicht muss man das eingangs zitierte Wort von John Steinbeck ergänzen. Den Verfall unserer Kultur wird man nicht nur am Staub auf dem Bücherregal erkennen, sondern auch an dem Büchertaub, der beim Öffnen von älteren, industriell hergestellten Büchern zu Boden rieselt.

## LITERATUR UND INTERNETLINKS

ALEXANDRIA: Vgl. die deutschsprachige Homepage der Bibliothek unter <http://www.bibliothek-alexandria.de> (Aufruf am 12.1.2004)

von ARETIN, Johann Christoph: Briefe über meine literarische Geschäftsreise in die baierischen Abteyen. In: Beyträge zur Literatur und Geschichte, vorzüglich aus den Schätzen der Königlichen Hof- und Centralbibliothek zu München. Bd. 1-6. München: Lindauer 1803-1807.

ARNOULT, Jean-Marie: [Bericht über die Bibliotheken im Irak] in: Website der International Federation Of Library Associations (IFLA) in Den Haag <http://www.ifla.org/VI/4/admin/iraq1509.htm> (mit Farbbildern; Aufruf am 10.1.2004)

BARROW, William J.: Deterioration of Book Stock. Causes and Remedies. Two Studies on the Permanence of Paper. Conducted by William J. Barrow. Ed. by Randolph Church. Richmond, VA: Virginia State Library 1959, S. 16.

BIBLIA 1545: Der Prediger Salomo III, v. 19/20. In: D. Martin Luther: Biblia. Das ist die gantze Heilige Schrift. Deusch auff's new zugericht. Wittenberg 1545. - Neudruck München 1974, Hrsg. von Hans Volz und Heinz Blanke, Bd. 2, S. 1141.

BLOCH, Werner: Das eingeäscherte Gedächtnis. Kaum Hilfe für die zerstörten Bibliotheken im Irak. In: NZZ Online vom 14.11.2003 [http://www.nzz.ch/2003\(11/14/fe/page-article97.NKJ.html](http://www.nzz.ch/2003(11/14/fe/page-article97.NKJ.html);

CASSON, Lionel: Bibliotheken in der Antike. Düsseldorf 2002.

CORSTEN/PFLUG/SCHMIDT-KUNSEMÜLLER 1989 ff.: Lexikon des Gesamten Buchwesens - Zweite, völlig neu bearbeitete Aufl. (LGB2), Hrsg. Severin Corsten, Günther Pflug und Friedrich Adolf Schmidt-Kunsemüller, Stuttgart 1989 ff. (bisher 6 Bände).

DEBES, Dietmar: Artikel „Erfurt“. In: Lexikon des gesamten Buchwesens (s.o. unter Corsten), Bd. 2, S. 482.

DEPPERT, Fritz: (Vortragstext ohne Titel). In: Darmstädter Autoren über Bücher und Bibliotheken. 11 Essays anlässlich der ersten hessischen Bibliothekswoche im April 1984. Darmstadt: Magistrat 1985, S. 12.

DEPULVERA: Es handelt sich um ein patentiertes Verfahren, das die Firma TiGiEmme srl in Bologna weltweit vertreibt. Näheres dazu unter <http://www.depulvera.com> (Aufruf am 25.4.2004)

DEUTSCHES Wörterbuch: Artikel „Gelehrsamkeit“. In: Deutsches Wörterbuch / von Jacob Grimm und Wilhelm Grimm. Vierten Bandes Erste Abtheilung Zweiter Theil: Gefoppe-Getreibs. Leipzig: Hirzel 1897.



DRESSLER, Fridolin: Die Bayerische Staatsbibliothek im Dritten Reich.  
In: Beiträge zur Geschichte der Bayerischen Staatsbibliothek. Hrsg. von  
Rupert Hacker. München: Saur 2000, S. 285-308.

EBERT, Friedrich Adolph: Über öffentliche Bibliotheken, besonders deut-  
sche Universitätsbibliotheken und Vorschläge zu einer zweckmäßigen  
Einrichtung derselben. Freyberg 1811. – Hier zitiert nach: Gottfried  
Rost: Der Bibliothekar. Köln/Wien: Böhlau 1990, S. 126 (Histo-  
rische Berufsbilder).

FABIAN, Bernhard: Der Gelehrte als Leser. In: Buch und Leser.  
Vorträge des ersten Jahrestreffens des Wolfenbütteler Arbeitskreises für  
Geschichte des Buchwesens, 13./14. Mai 1976. Hrsg. Herbert G. Göpfert.  
Hamburg: Hauswedell 1977, S. 48-88 (Schriften des Wolfenbütteler  
Arbeitskreises für Geschichte des Buchwesens, Bd. 1).

GARBER, Klaus: Verlust des kollektiven Gedächtnisses. Der Untergang  
der alten Hamburger Stadtbibliothek im Sommer 1943. In: Auskunft.  
Mitteilungsblatt Hamburger Bibliotheken, Jg. 14/1994, S. 77-91.

GELLERT, Christian Fürchtegott: Der Polyhistor. In: Charlataneria-  
eruditorum. Satirische und kritische Texte zur Gelehrsamkeit.  
Mit einem Nachwort hrsg. v. Alexander Kosenina. St. Ingbert:  
Röhrig 1995 (Kleines Archiv des achtzehnten Jahrhunderts; 23),  
S. 29 f. Erstdruck: Gellerts Fabeln und Erzählungen. Zweyter Theil.  
Leipzig: Johann Wendler 1748.

GLASSBACH, Christian: Das Bildnis eines durch und durch Gelehrten.  
Kupferstich. Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz,  
Kupferstichkabinett, AM 945-109. Abgebildet auch auf dem Vorsatz des  
Bandes „Charlataneria eruditorum“ (vgl. oben Gellert 1748).

GÖRES, Jörn (Hrsg.): Lesewuth, Raubdruck und Bücherluxus. Eine  
Ausstellung des Goethe-Museums Düsseldorf. Anton-und-Katharina-  
Kippenberg-Stiftung, 26. Mai bis 2. Oktober 1977.

HALM, Hans: Die Schicksale der Bayerischen Staatsbibliothek während  
des zweiten Weltkrieges. Nach amtlichen Berichten, persönlichen  
Aussagen und eigenen Erlebnissen dargestellt von Dr. Hans Halm.  
München: Universitäts-Buchdruckerei Wolf & Sohn 1949. Foto von  
Maximilian Eltrich, abgebildet im unpaginierten Anhang auf S. 9.  
Neudruck des Berichts ohne Fotos in: Beiträge zur Geschichte der  
Bayerischen Staatsbibliothek, a.a.O. (wie Dressler 2000), S. 309-316.

HILLER, Helmut und Stephan FÜSSEL: Wörterbuch des Buches. Fünfte,  
vollständig überarbeitete Auflage. Frankfurt/Main 2003.

HOEPFNER, Wolfram (Hrsg.): Antike Bibliotheken. Mainz 2002.

ISO 7606: Information and documentation – Paper for Documents – Requirements for Permanence (1994).

PAUL, Jean: Jeans Pauls sämtliche Werke. Historisch-kritische Ausgabe. Hrsg. von Eduard Berend. Erste Abteilung: Zu Lebzeiten erschienenen Werke, Bd. 8: Titan. Weimar 1933, S. 265.

PAUL, Jean: Von der Dummheit. In: Jean Paul: Sämtliche Werke. Hrsg. Norbert Miller. Bd. II, 1. München 1974, S. 268.

KIRCHNER, Joachim (Hrsg.): Lexikon des Buchwesens, Stuttgart 1952-1956.

KOSENINA, Alexander: Der gelehrte Narr. Gelehrten satire seit der Aufklärung. Göttingen 2003.

LESSING, Gotthold Ephraim: Brief vom 6. Juni 1771 an Johann Wilhelm Ludwig Gleim. In: Gotthold Ephraim Lessing: Werke und Briefe in 12 Bänden. Hrsg. Wilfried Barner u.a. - Bd. 11/12: Briefe. Frankfurt/M.: Deutscher Klassiker Verlag 1994, S. 210 (Brief Nr. 694).

LEXIKON des Gesamten Buchwesens. Hrsg. Karl Löffler und Joachim Kirchner. Leipzig 1935-1937.

LEYH, Georg: Die deutschen wissenschaftlichen Bibliotheken nach dem Krieg. Tübingen: J.C.B. Mohr (Paul Siebeck) 1947.

LEYH, Georg: Die deutschen Bibliotheken von der Aufklärung bis zur Gegenwart. In: Handbuch der Bibliothekswissenschaft. Begründet von Fritz Milkau. 2., vermehrte und verbesserte Auflage. Hrsg. von Georg Leyh. Bd. 3. Wiesbaden 1957, S. 477. Die Verlustzahlen einzelner Häuser sind S. 475/476 zusammengestellt.

LIPP, Walter und Harald Gieß: Die Staatliche Bibliothek (Provinzialbibliothek) Amberg und ihr Erbe aus den oberpfälzischen Klosterbibliotheken. Amberg: Staatliche Bibliothek (Provinzialbibliothek) Amberg 1991.

NEUHEUSER, Hanns Peter: Checkliste Staub, Schmutz, Schimmel in Archiven, Bibliotheken und Museen. In: Bibliotheksdienst, Jg. 36/2002, H. 10, S. 1228-1242.

RECLAMS Sachlexikon des Buches. Hrsg. von Ursula Rautenberg. Zweite, verbesserte Auflage. Ditzingen 2003.

SCHAAB, Rupert et al.: Der Kosmos des Wissens. Die Handschriften des Amplonius Rating de Berka in dem Band Bibliothek der Leidenschaften. Die historischen Sammlungen der Universitäts- und Forschungsbibliothek Erfurt/Gotha. Universität Erfurt 2003.

SCHIVELBUSCH Wolfgang: Die Bibliothek von Löwen. Eine Episode aus der Zeit der Weltkriege. München, Wien 1988.

SCHMIDT, Gerd: Bibliotheca Universitatis. Ein Streifzug durch die



- Vergangenheit. In: Freiburger Universitätsblätter. Heft 64 / Juli 1979 (Sonderheft über die Universitätsbibliothek Freiburg).
- SEEBACH, Heinrich Ernst: Thüringia literata, Manuskript F 116 im Thüringischen Hauptstaatsarchiv Weimar, datiert 1753, jedoch um 1737 entstanden.
- SILVER, Larry: The Problem that will not go away. In: Commission on Preservation and Access (des Council on Library Resources der USA), Newsletter No.22/April 1990.
- SPITZWEG, Carl: Der Bücherwurm. Gemälde. Museum Georg Schäfer, Schweinfurt.
- STAATS- und Universitätsbibliothek (SUB) Hamburg: „Operation Gomorrha“ auf der homepage in der Rubrik „Wir über uns“, <http://www.sub.uni-hamburg.de> (Aufruf am 27.4.2004).
- TETZEL, Wilhelm Ernst: Curieuse Bibliothec Oder Fortsetzung Der Monathlichen Unterredungen, 1. Repositorium, 5. Fach (1704), S. 457. Daten und Fakten aus der Geschichte des Erfurter Bibliothekswesens bei Felicitas Marwinski: Thüringens Metropole und ihre Bibliotheken. In: Miszellen zur Erfurter Buch- und Bibliotheksgeschichte. Hrsg. von Kathrin Paasch. Bucha bei Jena: Quartus 2002, S. 99-124.
- VON UFFENBACH, Zacharias Konrad: Merkwürdige Reisen durch Niedersachsen, Holland und Engelland, Theil 1, Frankfurt/M. (u.a.) 1753, S. CVII.
- „Umzug der Bibliotheca Amploniana - Wertvolle Sammlung des 2. Rektors an die Universität zurück“ Pressemeldung der Universität Erfurt vom 30.9.2002.
- USEMANN-KELLER, Ulla: Bestandsschäden in deutschen Bibliotheken. Untersuchung von 0.01 % der Bestände ausgewählter Bibliotheken der Bundesrepublik Deutschland durch das Deutsche Bibliotheksinstitut. In: Zeitschrift für Bibliothekswesen und Bibliographie, Jg. 36/1989, S. 109-123.
- WEIGEL, Christoph: Der Büchernarr. Kupferstich, 1710. Original im Museum für Kunsthandwerk, Frankfurt/Main.
- WILLIAM J. Barrow Institute: Permanence / Duration of the Book. Vol. 5: Strength and other Characteristics of Book Papers, 1800-1899. RICHMOND, VA: W.J. Barrow Research Laboratory 1967.
- ZEEB, Hartmut: Die Preservation Academy Leipzig. Bestandserhaltung und Massenentsäuerung. In: B.I.T. Zeitschrift für Bibliothek, Information und Technologie. Jg. 7/2004, H. 1, S. 66-69.

STEPHANIE JAECKEL

## VERSTAUBTE KUNST

### DIE ARBEIT DER RESTAURATOREN

Der berühmteste Staub der Geschichte lag in Pompeji: Am 24. August des Jahres 79 begrub ein vulkanischer Ascheregen den römischen Badeort unter sich und konservierte den antiken Alltag bis in die Neuzeit. Doch was den Historikern lieb, ist den Kunsthistorikern längst nicht teuer. Weil Kunst eben Kunst ist und nicht nur Geschichte. Prompt bekommt auch der Staub ein Doppelgesicht: als Schmutz zerstört er das Original, als Patina veredelt er alte Werke.

Für Restauratoren ein heikles Geschäft: Wischen sie den Staub weg, halten sie das Werk künstlich neu. Lassen sie den Staub liegen, setzen sie es dem Verfall aus. Und am Ende bleibt die unausweichliche Erkenntnis: Man kann das Altern nur verlangsamen, nicht aufhalten.

Der Beruf des Restaurators ist bis heute nicht geschützt. Eine akademische Ausbildung etabliert sich seit der Nachkriegszeit. Daneben sind autodidaktische Bildung und Museumspraktika üblich. So oder so – die Lehrzeit ist lang. Denn der ideale Restaurator ist ein Multitalent: Künstler, Handwerker, Naturwissenschaftler, Kunsthistoriker und vor allem ein Gedulds-mensch. [Die folgenden *kursiv* gesetzten Passagen stammen von einem fiktiven Restaurator.]<sup>1</sup>

*Ich wollte nach dem Abitur etwas mit den Händen machen. Bei uns zu Hause hingen viele Bilder. Mein Vater ist Kunsthistoriker. Ich habe ein Praktikum im Museum gemacht und später Chemie und Kunstgeschichte studiert. Damals gab es noch keinen Studiengang für Restauratoren. Die Ausbildung dauerte neun Jahre. Keine billige Angelegenheit. Auch heute ist das Metier eher etwas für höhere Töchter.*

*Beim Praktikum wird schnell klar, wer geeignet ist für den Beruf. Ein guter Test ist – und das kann jeder zu Hause machen – eine Glühbirne auf die Erde zu werfen und sie dann wieder zusammenzusetzen. Wer das an*

*einem Tag schafft ist prädestiniert. Aber auch wer sagt, ich mache das jeden Nachmittag zwei Stunden, solange bis ich fertig bin, wird wahrscheinlich kein schlechter Restaurator. Mein erstes Original war ein Bilderrahmen, mein erstes Bild ein italienisches Gemälde aus dem 16. Jahrhundert. Das war hinter einer schwarzen Ruß- und Staubschicht völlig verschwunden. Ich habe erst Schmutz gewischt und dann den Firnis abgenommen. Bei alten Bildern ist das nicht besonders heikel. Man kennt die Materialien, die die Maler benutzten und weiß genau, mit welchen Mitteln man den Staub der letzten Jahrhunderte wieder runter bekommt.*

*In der Ausbildung hatte ich keine Skrupel, ein Kunstwerk zu reinigen. Es gab schon mal nächtliche Panikattacken, ob ich ein Reinigungsgel wieder abgenommen habe. Aber das ging eigentlich allen Praktikanten so. Die Angst kam erst später. Ich saß vor einer blauen matten Farbfläche. Darauf war ein winziger heller Fleck. Staub haftet sofort an porösen Oberflächen. Ich wusste, wenn ich jetzt den Staub mit etwas Druckluft entferne, kann ich in sekundenschnelle einen doppelt so großen Fleck vor mir haben. Denn die Luft pustet mit dem Staub auch die Farbpartikel weg. Die Finger haben mir nicht gezittert, aber nervös war ich schon.*

### **WAS IST EIN ORIGINAL?**

Schon in der Antike wurden Kunstwerke bewahrt und gepflegt. Dennoch gibt es den Beruf des Restaurators erst seit dem 19. Jahrhundert. Vorher haben Künstler die Kirchenschätze und Sammlungen der Adligen betreut. So gut es ging. Aber oft ging es nicht gut. Denn es fehlte die nötige Erfahrung und das historische Interesse. War ein Loch in einem Bild, setzte der verantwortliche Hofkünstler einen Flecken unter und übermalte die Fehlstelle. Wenn er schon dabei war, malte er vielleicht noch etwas dazu, hier ein paar Wolken, dort ein paar Blätter an den kahlen Baum, und schon sah das Bild wieder frisch aus. Die ursprüngliche Fehlstelle war vielleicht eine Euro-Münze groß, die Übermalung umfasst am Ende ein ganzes Din-A-4 Blatt.

Erst im Klassizismus interessierte man sich dafür, wie die Kunst aus der Vergangenheit ursprünglich ausgesehen hatte. Jetzt gab es zum ersten Mal Künstler, die ihre kreativen Fähigkeiten zurückstellen, um alte Kunst fachgerecht zu reparieren. Doch der professionelle Restaurator taucht erst mit den ersten Museen auf, zu Beginn der Romantik.

Einer der Pioniere war Christian Philipp Koester (1781-1851) (vgl. Rudi 1999). Ein Biedermeiermaler, der sich weitgehend autodidak-

tisch gebildet hatte und in Heidelberg Landschaften und Porträts malte. Als die beiden Kölner Sammler Sulpiz und Melchior Boisserée 1810 nach Heidelberg zogen, beauftragten sie ihn mit der Pflege ihrer Bilder. Es waren hauptsächlich altdeutsche und altniederländische Meister, die sie spottbillig aus dem säkularisierten Kirchenbesitz erstanden hatten. Koester arbeitete sich gewissenhaft ein. So gewissenhaft, dass er 1824 nach Berlin berufen wurde, um die Exponate der neu einzurichtenden königlichen Gemäldegalerie aufzupolieren. 1827 bis 1830 veröffentlichte er seine Erfahrungen in drei Schriften „Über die Restauration alter Ölgemälde“. Das Thema lag offensichtlich in der Luft. Fast zeitgleich – von 1828 bis 1834 – publizierten Pierre Louis Bouvier und Friedrich Lucanus aus ihrer Restauratorenpraxis. Es sind die ersten Fachpublikationen im deutschsprachigen Raum: Ein neuer Beruf hatte sich etabliert.

Am Anfang gingen die Restauratoren in ihrem Eifer oft zu weit. Weil sie glaubten, mittelalterliche Bilder müssten genauso leuchten wie die Fenster der großen Kathedralen, putzten sie die Farben bis auf einen letzten durchscheinenden Rest weg. Die Boisserées notierten dazu in ihrem Tagebuch:

*„Ein großer Reiz lag schon darin, den Kunstwert oder überhaupt nur die Merkwürdigkeit eines Gemäldes durch die Krusten hundertjährigen Schmutzes hindurch zu erkennen. Und wie freuten wir uns, wenn wir unter der reinigenden Hand des Restaurators irgend einen Kopf oder ein Stück eines schönen blauen, roten oder grünen Gewandes, wenn wir einen Kräuterboden mit Erdbeerblüten und -früchten, mit Veilchen und anderen Frühlingsblumen aus dem dunklen Überzug von Kerzendampf und anderm Dunst klar hervortreten sahen.“*

(Boisserée, zit. nach Rudi 1999)

Doch waren die Brüder manchmal zu ungeduldig, um auf Koester zu warten. Dann griffen sie selbst zu Wasser und Seife, und wischten so manches Tafelbild einfach weg. Zerknirscht schrieben sie rückblickend: „Wie oft ergriffen wir selbst den nassen Schwamm, um uns diesen Genuss schon vorläufig zu verschaffen, weil wir es nicht erwarten konnten, bis der restaurierende Maler das Geschäft ordnungsgemäß vornahm.“ (Ebd.)

Auch wenn das Metier noch in den Kinderschuhen steckte, die grundlegenden restauratorischen Probleme standen Koester und seinen Zeitgenossen durchaus vor Augen. Dass jede Restaurierung eine Interpretation ist, bei der – wenn auch erst rückblickend – der jeweili-

ge Zeitgeschmack durchscheint oder dass oft der Besitzer der größere Feind des Kunstwerkes ist, als jeder noch so nagende Zahn der Zeit. Friedrich Welch warnt seine zukünftigen Kollegen ausdrücklich:

*„Es gibt Gemäldebesitzer, welche da wollen, dass ihre Gemälde öfters gereinigt werden. Da aber dadurch die Gemälde oft unnötigen Angriffen ausgesetzt werden, so sucht man solchen zu besorglichen Personen ihr Begehrt möglichst auszureden. (Denn) ohne Not unternehme man nichts – und wenn man selbst in eine kleine Fehde mit den gern putzenden Hausfrauen darüber geraten sollte.“ (Welch 1834)*

Die Romantik hatte das originale Kunstwerk entdeckt: Ein Zeugnis aus der Vergangenheit, das als authentisches Dokument in seinem ursprünglichen Zustand zu erhalten ist. Entsprechend restaurierte man zunächst auf neu. Denn als „original“ verstand man den Moment, in dem der Künstler das Werk vollendet hatte. Fand man ein Fragment gotischer Wandmalerei, war es selbstverständlich, die barocke Übermalung zu entfernen. Denn sie wurde als Störung verstanden, nicht als eigenständiger künstlerischer Ausdruck. Im zwanzigsten Jahrhundert weitete sich die Perspektive. Jetzt wurde nicht mehr nur die Geburt des Kunstwerks als original gewertet, sondern seine gesamte Lebenszeit. Erhaltungswürdig waren fortan auch die Veränderungen. Damit sind die beiden Pole benannt, zwischen denen sich das heutige restauratorische Tun bewegt: Dem Moment der Entstehung und dem gesamten Alterungsprozess eines Objektes.

*Originale alte Meister gibt es gar nicht mehr. Ich hatte bis heute um die 2.000 Bilder in meiner Werkstatt, davon waren höchstens vier oder fünf unbehandelt. Wenn der Mensch mit einem Bild lebt, tut er auch etwas daran. Leider oft zu viel des Guten. Denn die meisten Bilder sind regerecht „verrestauriert“. Wie dieses Bild aus der Tizianwerkstatt. Vor vielen Jahren einmal hat es ein Restaurator mit einem sehr scharfen Lösungsmittel gereinigt. Von der schönen Frau, die da liegt, sind Kopf und Brust „verputzt“, das heißt, die originalen Farben sind weggewischt. Er hat dann ein neues Gesicht gemalt, und weil zu seiner Zeit die fleischigen Tizianfarben nicht so in waren, hat er die Frau gleich noch ein bisschen „geputzt“, also mit kühleren Farbtönen übermalt. Jetzt liegt da eine Lady aus dem 19. Jahrhundert in einem Bild der Tizianwerkstatt. Und ich muss entscheiden, was das Original ist.*

*In diesem Fall habe ich mich für die Tizianwerkstatt entschieden. Weil es dieses Bild noch einmal von Tizian selbst gibt, ich also auf eine Vorlage zurückgreifen kann. Hätte ich diese Quelle nicht gehabt, wäre*

*ich auf meine Phantasie angewiesen gewesen. In diesem Fall hätte ich den Zustand aus dem 19. Jahrhundert bewahrt und nicht noch einen eigenen hinzugefügt.*

*Die Retuschen meines Vorgängers habe ich vorsichtig entfernt und jetzt schließe ich die Fehlstellen. Das Bild ist auf Leinwand gemalt. Das heißt, die Fäden laufen über- und untereinander, wie bei einer Berg- und-Talfahrt. Das scharfe Reinigungsmittel hat sozusagen die Berge abgetragen. Und die tupfe ich jetzt Punkt für Punkt wieder auf. Übermalen, wie noch im 19. Jahrhundert üblich, kommt heute nicht mehr in Frage. Im Grunde ist das Bild ein Glücksfall. Ein Kind ist mit dem Fahrrad reingefahren, so kam es in meine Werkstatt. Wegen der Retusche hielt man es für eine recht unbedeutende Tizian-Kopie. Jetzt ist es wieder ein Original. Natürlich kein unbehandeltes und erst recht kein echter Tizian. Dafür aber ein alter Meister aus dem 16. Jahrhundert.*

#### NASS ODER TROCKEN?

Wer putzt, kennt das Problem: Ist der Staub frisch, lässt er sich durch leichtes Pusten, Wischen oder Wedeln entfernen. Liegt er jedoch schon länger, hat sich eine wollige Kruste gebildet, die nicht mehr so leicht zu entfernen ist. Jetzt kommt es auf den Untergrund an: Ist er wasserfest, kann man unbesorgt den Schwamm nehmen. Ist er jedoch wasserempfindlich, wird das Säubern zu einer längeren Prozedur. Ähnlich verhält es sich bei Kunstwerken. Ölbilder, die mit einem schützenden Firnis überzogen sind, lassen sich feucht abwischen. Zuerst staubt man die Bildfläche locker mit einem Wolltuch ab, Rückseite und Rahmen mit einem Handfeger. Den festsitzenden Schmutz kann man dann mit einem feuchten weichen Ledertuch abwischen.

Zum nassen Reinigen gab es zu den verschiedenen Zeiten die verschiedensten Empfehlungen. Bis heute üblich sind Seifen und Reinigungspasten, von denen allerdings nur der Schaum mit einem Wattestäbchen aufgetupft wird. Umstritten sind Milch oder rohe Kartoffeln, durchaus gängig dagegen das Säubern mit der eigenen Spucke. Diese – im Fachjargon als „humanenzymatische Reinigung“ bekannte – Praxis führt jedoch bei rauchenden Restauratoren zu unerwünschten Effekten.

Temperafarben sind wasserlöslich und deswegen nur trocken zu reinigen. Frisches, möglichst noch warmes Graubrot ist ein uraltes Mittel. Es hat allerdings den Nachteil, Fliegen anzuziehen. Und deren Rückstände sind schwieriger zu beseitigen als alter Staub. Ansonsten

stehen verschiedenste Formen von Radiermitteln zur Verfügung. Kautschuckschwämme nehmen die Verschmutzungen gut auf. Ihre Rückstände sind auch für das Werk nicht schädlich. Und es gibt längst nicht nur Radiergummis. In der Restauratorenwerkstatt hat man die Wahl zwischen Radierpulver oder -kissen, Radierkrümel, -schwämmen, -mienen und -stifte.

Insgesamt verbrauchen Restauratoren wenig Reinigungsmittel. Deshalb ist es für die Industrie nicht lukrativ, Spezialprodukte auf den Markt zu bringen. So behilft man sich in den Werkstätten mit gängigen Wasch- und Reinigungsmitteln. Spüli oder Rei in der Tube liegen in den Regalen: auch hier ist Improvisationstalent gefragt. Allerdings weiß keiner so genau, welche Schäden sie anrichten. Erst seit kurzem gibt es die Möglichkeit, Veränderungen durch industrielle Putzmittel zu untersuchen. Noch ist für das bloße Auge nicht viel zu sehen. Doch hängen schon viele Bilder in den Museen, unter deren Oberfläche die Malschicht unrettbar verquollen ist: Totalschäden, die dem nächsten Restaurator unweigerlich unter den Händen zerfließen werden.

*Morgens fange ich um zehn Uhr an. Früher hat es keinen Zweck. Denn dann sind die Augen noch nicht ausgeschlafen. Das menschliche Auge schläft länger als der übrige Körper. Deshalb kann ein Restaurator nach dem Aufstehen noch nicht genug sehen. Mehr als drei Stunden arbeite ich dann nicht am Stück vor einem Bild. Denn dann werden die Augen wieder müde. Ein Restaurator sitzt sowieso nicht nur vor der Staffelei. Als Freiberufler fahre ich ziemlich viel rum, um Gutachten zu erstellen oder private Gemälde zu Ausstellungen zu begleiten. Manchmal bin ich auch Psychologe. Wenn die Kunden ihre Bilder bringen und die Geschichte erzählen, die sie mit ihnen verbindet. Das ist oft dramatisch, Kriegserlebnisse oder Erbschaften. Bei mir in der Werkstatt sind schon viele Tränen geflossen.*

*Wer im Museum arbeitet, ist die meiste Zeit damit beschäftigt, Bilder reisefertig zu machen. Sie werden gereinigt und alles, was runterfallen oder abbrechen könnte, wird gesichert. Wenn sie sehr empfindlich sind, brauchen sie eine eigene Klimakiste. Das ist eine Art Vitrine auf Reisen. Damit das Kunstwerk auch unterwegs seine gewohnte Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit hat.*

## DIE VITRINE

Verglaste Schauschränke oder Kästen sind die wichtigsten Möbel im Museum. An ihnen pilgern die Besucher vorbei – im gehörigen Abstand, denn aufstützen oder anrempeeln ist untersagt. „Ausstellungshilfen“ heißen sie im Fachjargon. „Mittels eng schließender Gläser“, so das Handbuch der allgemeinen Museologie, „sind sie dicht und bieten auf diese Weise objektgerechten Schutz vor Schäden durch Staub“. Und durch Besucher. Wenn das Licht grell wird, bleibt die Vitrine leer. Dann verwandelt sich der Besucher in das Ausstellungsstück, das ihm mit aufgerissenen Augen entgegenblickt.

Viele Vitrinen sind Maßanfertigungen. Weil ein empfindliches Exponat sein ganz eigenes Klima braucht. „Glassärge“ schimpfen die Besucher, die ihre Hände sehnsüchtig nach dem schönen Kunstschneewittchen ausstrecken, wie Kinder, die nach dem greifen, was sie benennen wollen. Und das Exponat liegt derweil „unter künstlichem Licht, ein Fossil seiner selbst, beziffert, und ohne Geruch (...Es) schläft. (Es) läßt sich betrachten, vertreibt sich seine Langeweile, weiß nicht wie, hat jede Verbindung zu seinesgleichen verloren und sieht wie seine Beschreibung im Handbuch aus. In Stellvertretung einer ganzen Kultur. Ein Musterexemplar. (... Es) zieht sich in sein Gedächtnis zurück, dort hat (es) mit seiner Beschriftung nichts zu tun, dort dringt kein anonymes Interesse ein, dort konserviert (es) kein fachkundiges fremdes Gehirn.“ (Meckel 1986)

*Hier habe ich gerade ein Bild von Ad Reinhardt auf der Staffelei. Reinhardt gehört zu den amerikanischen Minimalisten, die in den sechziger Jahren radikal die Grenzen traditioneller Kunst sprengten. Er malte damals nur noch schwarze Quadrate. Erst denkt man, er habe die Leinwand nur angestrichen. Aber nach einer Weile sieht man unter dem Schwarz Farben aufleuchten. Tatsächlich hat Reinhardt die Bilder erst in bunte Quadrate unterteilt, die er dann schwarz übermalte. Leider ist sein Schwarz sehr empfindlich. Er hat die Bilder nicht gefirnißt, das heißt, die Oberfläche bleibt porös. Jeder anfliegende Staupartikel kann sich festsetzen. Schon zu Lebzeiten Reinhardts kamen die Bilder meist beschädigt von den Ausstellungen zurück. Damals hat er sie einfach neu gemalt mit Farben, die er für solche Notfälle aufbewahrte. Heute müssen wir sehen, wie wir die Schäden so gering wie möglich halten. Dieses Bild kam mit 64 hellen Stellen zu mir. Das ist verheerend für eine monochrome Fläche. Sie will ja bewegungslos sein. Und die Flecken bringen eine ziemliche Unruhe. Für die Arbeit habe ich sechs Wochen*



*veranschlagt. Jetzt sind vier Wochen um, und ich denke, ich bin fertig. Genau kann man das vorher nie wissen.*

*Mit Privatkunden vereinbare ich deshalb oft eine feste Arbeitszeit. Dann sehen wir uns das Objekt nach 30 Stunden an und überlegen, ob es sinnvoll ist, weiterzumachen. Bei dem Reinhardt ging die Arbeit so schnell, weil viele der 64 Stellen tatsächlich nur lose aufliegende Staubflecken waren. Ich konnte sie mit einem Pinsel aufrühren und dann wegblasen oder ganz vorsichtig absaugen. Wenn der Schmutz jedoch in die Oberfläche eingedrückt ist, geht es nicht mehr so leicht. Denn dann sind die Farbpigmente zusammengeschoben, und was vorher porös war, ist jetzt kompakt. Da hilft auch kein noch so gewissenhaftes Säubern. Selbst wenn ich unter dem Mikroskop kein einziges Stäubchen mehr sehe, bleibt die Stelle für das bloße Auge hell. Ich könnte dann noch retuschieren. Ich habe die originalen Farben, die Reinhardt verwendet hat, vorrätig. Aber in diesem Fall habe ich mich dagegen entschieden. Ein Bild aus den sechziger Jahren muss nicht neu aussehen. Ein Mensch ist nach 40 Jahren auch kein Teenager mehr.*

#### **PATINA**

Marmor bricht, Granit splittert, Sandstein krümelt. Kupfer wird grün, Fresken blass, Ölgemälde dunkel, kurz: Kunstwerke altern. Restauratoren sprechen von Patina.

Staub und Schmutz sind noch die harmloseste Variante. Sie liegen meist lose auf und können weggewischt werden. Schwieriger wird es, wenn das Kunstwerk lange vergessen war. Dann ist die Oberfläche verwittert oder verkrustet, die Patina unlöslich mit dem Werk verbunden.

Heute wird sie schon im Voraus bekämpft. Ein großer Teil restauratorischen Tuns besteht darin, Alterungsprozesse aufzuhalten. Es gab aber auch Zeiten, da wurde die Patina gehegt und gepflegt. Denn sie galt als Garant für die Echtheit eines Kunstwerks. Ein alter Meister ohne Risse ist nun mal verdächtig. Aber den Käufern im 19. Jahrhundert gefiel er auch, dieser warme goldene Ton, der die gemalten Welten in die Abendsonne einer besseren Vergangenheit tauchte.

Eine zeitgenössische Satire schildert, wie Galeristen damals ihre Kunden mit echter oder gefälschter Patina hinter das Licht führten: „Ein Gemälde, welches recht alt aussieht, mag es nun wirklich von einem großen Meister sein oder nur hinter dem Kamin vom Rauch gebräunt, wird vom Kunden teuer bezahlt. Ist es da dem Spekulant zu ver-

denken, wenn er solchen Herren ihre schwache Seite abgewinnt und sie zu seinem Vorteil zu nutzen sucht?“

Es gibt Illustrationen, die den Zeitgott Kronos zeigen, der mit seiner Tabakspfeife Rauch auf ein Bild bläst. „Nun, der Dampf wird schon das Seinige tun und Geld in Fülle für das Meisterwerk bringen.“ Damit das Bild durch den Rauch nicht an Glanz verliert, steht ein Topf Firnis bereit. Er wird nach der Dampfbehandlung übergestrichen „und dann wollen wir wohl einen Kunstkennner finden, der es nicht für einen alten Niederländer hält!“ (Zit. nach Althöfer 1980)

Nachgedunkelt wurde aber nicht nur mit Betrugsabsichten. In den Werkstätten der Museen stand immer ein Eimer mit verbräuntem Firnis bereit, um den Originalen den so geschätzten „Galerieton“ zu verpassen. Franz Lenbach trug ihn schon im Atelier auf, um seinen Bildern einen Hauch von Rubens oder Tizian zu geben. Mit den ersten Kunsthistorikern kamen auch die ersten Oeuvrekataloge auf den Markt. Seitdem läßt sich eine Fälschung nicht mehr so leicht einem alten Meister unterjubeln. Seitdem hat aber auch die Patina ausgedient. Denn einmal im Werkverzeichnis aufgenommen, muss der Rembrandt nicht mehr alt aussehen. Im Gegenteil. Sauber muß er sein. Dem Abbild im Museumskatalog in nichts nachstehen. Erst recht auf dem Kunstmarkt: Der Besitzer eines ruinösen Bildes bleibt der Besitzer.

Makellos sauber ist Kunst von Konsum kaum noch zu unterscheiden. In seiner Serie „The New“ spielte Jeff Koons Ende der achtziger Jahre diese Ambivalenz aus. Er stellte fabrikneue Hoover-Staubsauger in Museumsvitrinen und aktualisierte so das avantgardistische Readymade. Die Kunstkritiker schwärmten, Koons sei der neue Duchamp in der zeitgenössischen Warenwelt, aber mancher Besucher spielte nicht mehr mit:

„Für mich ist es keine Kunst, wenn er Staubsauger dahinstellt. Das mache ich auch. Ich stelle die Geräte mal da hin, mal dort hin, und ich bin kein Künstler. (...) Wenn er mir jetzt einen Turm baut aus zwanzig Hoover-Geräten, und das Ding steht, das ist für mich Kunst. Das würde ich verstehen. (...) Meiner Meinung nach ist das Zeitvertreib. (Aber) wie soll man entscheiden, das ist Kunst und das ist keine. Irgendwie ist alles Kunst, was man macht. Es ist schon eine Kunst zu überleben, und wenn der so überleben kann, dann ist das Kunst.“<sup>2</sup>

*Dass ich Staub auf ein Gemälde aufbringe, ist wesentlich seltener, kommt aber auch vor. Wenn ich zum Beispiel ein älteres Gemälde an einer Stelle restauriert habe, der Besitzer aber, meist aus finanziellen*

*Gründen, eine Gesamtreinigung ablehnt. Dann habe ich ein mit den Jahren verstaubtes Bild mit einem hellen Fleck drauf. Den muss ich dann wieder abdunkeln.*

*Antiken Staub kann ich natürlich nicht nachmachen. Doch ich kann einen Staub finden, der in seiner Farbigkeit dem des Gemäldes nahe kommt. Dafür habe ich von meinen Reisen Stäube aus verschiedenen Ländern mitgebracht. Das hier ist Straßenstaub aus London, ein ziemlich kaltes Grau. Dieser hier ist vom Fußboden meiner Werkstatt. Er ist gelblicher, denn da ist viel Abrieb vom Holzboden mit drin. In so einem kleinen Glas stecken mehrere Staubsaugerbeutel. Ich siebe den Inhalt mit immer feineren Sieben durch, um kleine Steine oder Splitter rauszuholen. Denn die möchte ich ja später nicht auf einem kostbaren Gemälde haben. Gesiebt ist der Staub so fein und luftig wie Mehl oder Kaopulver.*

*Ich habe auch reine Naturstäube, gemahlenen Schiefer zum Beispiel. Das ist vielleicht kein Staub im engeren Sinn, denn es ist ja nur Schiefer. Während „richtiger“ Staub eine bunte Mischung von Partikeln ist, ein Cocktail, das vom Wind an bestimmten Orten zu bestimmten Zeiten zusammengeschüttelt wird. Der Übergang zum Pigment ist bei diesen Steinstäuben fließend. Hier habe ich zum Beispiel roten Lehm aus Gran Canaria und daneben so einen satten Ockerschlämm aus der Nähe von Arles. Der Abrieb von farbigen Böden wurde auch früher schon von den Malern zur Herstellung von Farben verwendet. Ich suche also einen Staub, der farblich gut zu dem Bild passt und tupfe die gereinigte Stelle mit einem Pinsel ganz vorsichtig wieder zu. Die Staubpartikel bleiben gut auf der rauhen Oberfläche kleben und geben die gewünschte Patina. Schwierig ist nur, den Rand hinzukriegen. Tupfe ich zu viel auf, habe ich am Ende einen dunklen Ring. Und der ist genauso schlimm, wie ein heller Fleck.*

### **DER KÜNSTLER ALS RESTAURATOR?<sup>3</sup>**

A: Die fertigen Bilder sind mir egal. Was aus dem Atelier geht, gehört dem Restaurator.

B: Das ist doch nicht egal! Meine Bilder sollen auch in Zukunft noch meine Bilder sein. Da lasse ich keinen ran.

C: Und was machst du, wenn du tot bist? Man muss doch auch mal loslassen können.

B: Solange ich lebe, wird meine Kunst nicht alt.

A: Du hast wohl eine Schaffenskrise – oder warum malst du immer an

deinen alten Schinken rum?

C: Ehrlich, für mich ist ein Bild, das ewig neu aussieht, fürchterlich.  
Das lebt nicht, das atmet nicht.

B: Kunst ist Kunst und kein Leben.

A: Haltbarkeit interessiert mich nicht. Meine Kunst ist aktuell.

B: Aktuell! – Aktuell ist das Fernsehen. Und das zieht den Staub geradezu magisch an. Meine Bilder sind für die Ewigkeit.

C: Quatsch! Kunst ist wie alles andere im Fluss. Die altert genauso wie meine Großmutter. Ich restauriere nicht und ich lasse auch nicht restaurieren.

B: Ich restauriere.

*Wenn ich ungeduldig werde, höre ich sofort auf. Entweder arbeite ich an einem anderen Objekt weiter oder ich gehe erst einmal spazieren. Ein Bild zu reinigen, kann Wochen dauern: stundenlang die gleiche Handbewegung. Das hält keiner lange aus. Restaurieren ist ein Prozess. Da kann ich nicht sagen, bis um eins muss ich zehn Quadratzentimeter geschafft haben. Mit so einer Haltung arbeitet keiner lange in diesem Metier. Man befindet sich ununterbrochen in einer Art Zwischenstand. Auch in dem Moment, in dem man aufhört. „Fertig“ gibt es nicht. Eine gelungene Restaurierung darf einen auf gar keinen Fall euphorisieren. Es wäre ein Fehler, zu denken, das geht beim nächsten Mal genauso gut. Jedes Objekt hat seine Vita und seine Eigenheiten, selbst wenn es vom gleichen Künstler ist.*

### STAUBKUNST

Für die „alten Meister“ war es selbstverständlich, auf Haltbarkeit zu arbeiten. Als Handwerker kannten sie für jedes Material die nötigen Tricks, und ihre Werke waren in sich schlüssige Konstruktionen. Doch mit der Industrialisierung änderte sich auch das Selbstverständnis der Künstler. Seit es Malerbedarf im Geschäft zu kaufen gab, konnten sie sich ganz auf Form und Inhalt konzentrieren. Haltbarkeit war kein Thema mehr in den Ateliers. Dafür gab es ja jetzt die Restauratoren. Bis heute sind es nicht unbedingt die ältesten Kunstwerke, die restauriert werden. Der Großteil der „Patienten“ stammt aus der Zeit nach der Industriellen Revolution.

Doch die eigentliche Revolution fand erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts statt. Die Avantgarde blies zum Sturm gegen alles Museale. Kunst sollte nicht länger Kunst sein, sondern Teil des Lebens. Und

auch der Staub fand Eingang in die heiligen Hallen. Collagen, Ready-mades und Performances, Techniken von der Straße, stellten die Restauratoren vor ganz neue Aufgaben. Denn jetzt war es nicht mehr selbstverständlich, beschädigte Kunst wieder in Ordnung zu bringen. Jetzt stellte sich eine ganz neue Frage: Wünscht der Künstler überhaupt die Rettung seines Werkes oder sind Staub und Verfall Teil des künstlerischen Konzepts?

Restaurieren bekam eine neue Dimension. Plötzlich war Nichtstun auch eine Tugend. Konservieren, das Aufhalten der Alterungsprozesse, lief dem Wiederherstellen den Rang ab. Der unorthodoxe Umgang mit Materialien in den Ateliers brachte auch die Werkstätten zum Experimentieren. Nicht länger taugten die traditionellen Rezepturen, Improvisation war das Gebot der Stunde. Mittlerweile unterteilen Restauratoren moderne und zeitgenössische Kunst nach dem Grad ihrer Empfindlichkeit.

So gibt es Objekte in traditioneller – jedoch billig ausgeführter – Technik. Denn viele Künstler kaufen nicht im Fachhandel, sondern im Baumarkt. Und hier wird die Haltbarkeit des Materials auf höchstens 15 Jahre veranschlagt. Dabei sind ruhige Bilder besonders anfällig für Staub. Die monochrome Flächen von Yves Klein, Mark Rothko oder Ad Reinhardt verlieren sofort ihre Präsenz und wirken schäbig.

Dann gibt es Objekte, die aus Alltagsgegenständen zusammengesetzt sind. Spoerris Fallenbilder zum Beispiel oder Werke von Joseph Beuys. Hier wird viel an Modellen experimentiert, doch die künstlerische Entscheidung, vergängliche Materialien zu verwenden, ist bei jedem Eingriff mitgedacht. Wenn Sigmar Polke auf transparenter Folie druckt und malt, ist das eine Arbeit auf Zeit. Denn die Folie sondert mit der Zeit Weichstoffe ab und reißt. Ein Pflaster von hinten ist aussichtslos. In so einem Fall bleibt das Bild kaputt.

Konzeptkunst oder Performances bilden einen eigenen Bereich. Denn eigentlich sind sie nur für die Fantasie des Betrachters oder für den Augenblick ihrer Inszenierung gedacht. Heute werden sie meist auf Film oder Video dokumentiert. Doch die Halbwertszeit neuer Medien ist bislang auf wenige Jahre beschränkt. Und jede weitere Kopie bedeutet Qualitätsverluste. Hier öffnet sich seit den sechziger Jahren ein neues und weites Feld für die Restauratoren.

Moderne Kunst, so das Fazit, ist instabil. Staub lässt sich nicht mehr unbefangen putzen. Sogar ein Staubtuch kann Kunst sein. Da sind dem Restaurator oft enge Grenzen gesetzt. Eine Schokoladenskulp-

tur von Diether Roth, die in der Sonne gelegen hat, ist nicht mehr zu retten. Ein Blick in die Antikensammlungen mag trösten. Selbst wo Nasen abgeschlagen sind, Gliedmaßen fehlen oder nur noch Scherben übrig sind, können wir die künstlerischen Intentionen noch erkennen. Diether Roths geschmolzene Schokolade hätte allerdings auch hier keine Chance. Was in wichtigen Funktionen nicht mehr da ist, so der Restaurator, ist nicht mehr vorzeigbar.

*Die größte Gefahr ist, sich seiner Sache sicher zu sein. Das beginnt schon mit dem Reinigen. Denn ich muss entscheiden, ob der Staub einfach nur Schmutz ist oder als Patina zum Kunstwerk gehört. Anfangs sitze ich nur vor dem Objekt. Ich versuche herauszufinden, ob es „natürlich“, also gleichmäßig, altert oder ob sich nur einzelne Teile verändern. Das kann ein Keks sein, der langsam zerbröseln oder ein Fettfleck, der unablässig Staub anzieht. So etwas verzerrt sofort den Gesamteindruck. Ich kann versuchen, das wieder zu richten. Aber die Materialien sind oft so empfindlich, dass ich den Schaden nur vergrößern würde. Das heißt nicht, dass man mit verschränkten Armen zusehen soll, nach dem Motto: „Ich bin ein guter Restaurator, indem ich überhaupt nichts mache.“ Aber ich muss abwägen. Und, ehrlich gesagt, die Idee, den Verfall mit immer größer werdenden technischen Möglichkeiten aufzuhalten, finde ich fatal.*

### DER FALL JOSEPH BEUYS

Er arbeitete gerne mit bedeutungslosen Materialien, mit Müll oder Kehrriecht. Das Wiederverwerten von Altem und Ausgedientem, so erläuterte Joseph Beuys diese Vorliebe, sei Ausdruck für den Kreislauf zwischen Kunst und Leben. Es war aber auch ein Zeichen der Nachkriegszeit, gegen die hehre Museumskunst Kunst von der Straße zu klaben.

So sieht das „Halbierte Filzkreuz mit Staubbild Maria“ – heute im Kölner Museum Ludwig – aus, als käme es direkt vom Trödel. In einem alten verglasten Holzkasten klebt ein Stück Filz, auf dem ein kleines Bild mit einer plattgedrückten Staubfluse und ein Zettel befestigt sind, dazu zwei abgeschnittene Zehennägel und ein paar Woll- und Staubbügelchen. Die Reste der Aktion „Ausfegen“, die 1979 in der Galerie René Block stattfand, kommen dagegen direkt aus dem Abfalleimer. In einem weißen Papierumschlag ist Dreck, den Beuys damals von dem New Yorker Galerieboden zusammenfegte.

Aber auch wenn er weder Staubflusen noch Straßenschmutz be-

nutzt: Sämtliche Arbeiten von Beuys lassen sich im Grunde nur über den Staub erklären. Denn stets geht es ihm um die Verwandlung alles Irdischen. Und spätestens hier hat der Restaurator ein Problem. Denn Staub ist plötzlich nicht gleich Staub. Bis zu einem gewissen Grad gehört er zum Kunstwerk dazu als sinnliches Zeichen des Alterns. Darüber hinaus aber verschmutzt er das Werk, und droht ein 20.000 oder 60.000 Euro teures Exponat zu zerstören.

Die Präsentation seiner Arbeiten ist daher für jedes Museum mit der gleichen Frage verbunden: Zeigen wir ihn mit Plexiglas oder zeigen wir ihn ohne? Beuys selbst macht bei seinen Objekten durchaus Unterschiede. Einige, wie das „Halbierte Filzkreuz“, legt er in Holzvitrinen, andere, wie die berühmten Fettecken, sind schutzlos dem Staub ausgesetzt. Die Museen entscheiden mal so, mal so. Die einen stellen die Fettecken unter Glas. Nicht nur wegen des Staubs, sondern weil altes Fett auch stinkt. Die anderen nehmen den Geruch in Kauf und verweisen auf den hohen Reflexionsgrad des Künstlers: der habe schließlich gewußt, dass Fett mit der Zeit verschmutzt, also sei der Dreck Teil des Konzepts.

Das Duisburger Lehmbruck Museum macht es wie Beuys und entscheidet je nach Exponat. So wird der „Beuys-Flügel“ zwar abgewischt, damit er dunkel glänzt wie man es von einem Konzertflügel erwartet, doch an das Filzobjekt daneben geht keine Reinigungskraft. Es ist längst mattgrau eingestaubt. Manche Vitrinen bleiben sogar oben offen. So ist das Exponat vor neugierigen Besucherfingern geschützt, doch der Staub kann von oben ungehindert einschweben.

*Wenn der Künstler noch lebt, rufe ich ihn an. Aber es ist nicht immer einfach. Weil die meisten Künstler sich nicht für ihre alten Werke interessieren. Mir hat schon mal einer einen Topf Farbe geschickt mit der Anweisung „Streich' das neu, das muss wieder sauber sein!“ Natürlich ist das verlockend. Aber Alterserscheinungen sind auch eine Handschrift. Nehmen wir eine weiße Farbfläche. Sie hat eine Qualität, die typisch ist für den Menschen, der sie gemacht hat. Eine Fläche weiß streichen kann jeder. Dennoch macht es jeder anders. Und diese persönlichen Dinge zu wahren, ist der ganze Aufwand, den ich betreibe. Insofern ist es manchmal auch besser, ich rufe den Künstler nicht an.*

*Restauratoren arbeiten in einem Schwellenbereich. Wenn sie gut sind, sieht der Betrachter nichts mehr. Wenn er etwas sieht, heißt es gleich „Da hat wohl auch schon mal jemand dran rumrestauriert“ – und das bedeutet nichts anderes, als dass es nicht gut gelungen ist.*

### ANMERKUNG

- 1) Bernhard Eipper, Wolfram Gabler, Otto Hubacek, Wiebke Müller und Andreas Piel haben für den fiktiven Restaurator in diesem Text Pate gestanden. Ihnen allen gilt mein herzlicher Dank.
- 2) Interview mit einem Berliner Staubsaugerverkäufer aus Jungle World 08.
- 3) Die verschiedenen Positionen bei Götz 1992.

### LITERATUR

- ALTHÖFER, Heinz: Moderne Kunst. Handbuch der Konservierung. Düsseldorf 1980.
- DERS.: Das 19. Jahrhundert und die Restaurierung. Beiträge zur Maltechnik und Konservierung. München 1987.
- BOUVIER, Pierre Louis: Vollständige Anweisung zur Ölmalerei für Künstler und Kunstfreunde. Halle 1828.
- BRACHERT, Thomas: Gemäldepflege. Ravensburg 1955.
- DERS.: Patina. Vom Nutzen und Nachteil der Restaurierung. München 1985.
- EIPPER, Paul Bernhard, FRANKOWSKI, G., OPIELKA, H, WETZEL, J.: Die Reinigung von Ölfarbenoberflächen und ihre Überprüfung durch das Raster-Elektronen-Mikroskop, das Niederdruck-Raster-Elektronen-Mikroskop, die Laser-Profilometrie und die 3D-Messung im Streifenprojektionsverfahren. München 2004.
- GÖTZ, Stephan: Interviews über Entstehung und Konservierung zeitgenössischer amerikanischer Kunst. Stuttgart 1992.
- LUCANUS, Friedrich: Anleitung zur Restauration alter Ölgemälde und zum Reinigen und Bleichen der Kupferstiche und Holzschnitte. Leipzig 1828.
- RÖNNER, Joachim: Phänomen Staub. Dokumentation einer Idee. Linz 1988.
- RUDI, Thomas: Christian Philipp Koester. 1781-1851. Maler und Restaurator. Frankfurt/M. (u.a.) 1999.
- WAIDACHER, Friedrich: Handbuch der allgemeinen Musikologie. Wien (u.a.) 1996



INTERVIEW MIT DER PSYCHOANALYTIKERIN ELFIE PORZ

## WARUM MACHT PUTZEN GLÜCKLICH?

*Die Deutschen, so haben neue Studien ergeben, sind keine Putzteufel mehr. Nur noch vierzig Prozent praktizieren den „Großen Hausputz“. Sogar die Aufwendungen für die Körperpflege gehen zurück. Verschludern wir?*

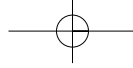
Der Putzwahn der Wirtschaftswunderjahre kommt nicht wieder, das ist richtig. Doch der hatte auch historische Ursachen, er hing einerseits mit dem Einfluss der hygieneeuphorischen Amerikaner zusammen und war andererseits wohl auch eine Reaktion auf die staubigen Trümmerszenarien der Nachkriegszeit. Aber die Zukunft des Putzens ist gesichert, da müssen wir uns keine Sorgen machen. Schon allein deshalb, weil das Putzen, wenn man genau hinsieht, eine überraschend interessante Tätigkeit ist. Es ist eine multifunktionale Einrichtung, aus der sich ein vielfältiger Lustgewinn ziehen lässt.

*Was soll denn am Putzen so interessant sein?*

Putzen ist nicht nur Schmutzbeseitigung. Es ist ein Prozess, der auf ganz verschiedene Weisen kultiviert werden kann. Man findet eine bunte Vielfalt von Riten und Gebräuchen, die sich in reizvoller Weise analysieren lassen. Und darin liegt zumindest das psychologisch Spannende am Putzen. Denn es gibt da schon merkwürdige Methoden.

*Welche zum Beispiel?*

Nicht jedes Putzen führt dazu, dass es sauberer wird. Es gibt den chaotischen Putztyp; das sind Leute, die es hinbekommen, beim Putzen zugleich Chaos abzubauen und fortwährend neues zu erschaffen. Diese Putzenden kommen kaum über den Anfang ihrer Vorsätze hinaus, obwohl sie unentwegt tätig sind. Denn sie fangen stets an mehreren Fronten an, ohne eine Sache zu Ende zu bringen, bis am Ende die ganze Wohnung mit Resten überzogen ist und der Putzende erschöpft aufgibt.



*Das ist dann die Beseitigung von Unordnung durch Häufung derselben?*

Den Chaoten ist es unabdingbar, dass Chaos erhalten bleibt. Die können die Wäsche nur waschen, wenn sie woanders einen Eimer Putzwasser hinstellen und vergessen. Und die können ein Zimmer nur putzen, wenn sie gleichzeitig nebenan die Bügelwäsche auf dem Bett verteilen und liegenlassen. Die fangen überall an, bis allmählich Unübersichtlichkeit eintritt. Es ist ein sehr aufwendiges Herumfuhrwerken mit minimalen Effekten. „Ich laufe lieber jeden Tag fünf Kilometer in der Wohnung, statt einmal nachzudenken“, ist eine typische Aussage.

*Und der Effekt der ganzen Übung ist gleich null?*

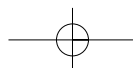
Nein: Der Effekt ist die Erhaltung des Status quo. Denn wenn Sie gar nichts tun, und Sie haben zum Beispiel kleine Kinder, dann können Sie irgendwann keinen Schritt mehr gehen. Es geschieht bei den Chaoten nicht nichts. Es wird ein labiles Gleichgewicht aufrechterhalten.

*Wie erklären Sie sich das?*

Ich denke, bei den Chaoten geht es um mehrere Dinge. Zum einen um eine ganz auffällige Beweisführung, wie schwer man es im Leben hat, mit wie viel man zu kämpfen hat und dass man nicht voran kommen kann. Um es in einem Bild zu sagen: Die trampeln immer auf der Stelle. Aber das mit großer Energie. Was hier oft vorliegt, ist eine Angst vor einer Entwicklung. Weg vom Status quo würde bedeuten, eine Richtung zu finden, eine Entwicklung zuzulassen. Etwas Ähnliches kann man auch vom entgegengesetzten Putztyp, von den Systematikern sagen, obwohl die sich beim Putzen ganz anders verhalten, nämlich nach einer ausgeklügelten Ordnung. Sie putzen vor dem Schmutz her. Der Schmutz wird vernichtet, ehe er entsteht.

*Ist das nicht sinnvoll?*

Da gibt es einen ganz starren Plan, einen ganz strengen Plan, nach dem alles behandelt wird. Und es gibt einen Extraplan, der festlegt, wann noch einmal besonders gründlich geputzt werden soll, etwa vor Weihnachten oder im Frühjahr. Es wird versucht, die Unberührtheit zu halten und das chaotische Herumfuhrwerken gar nicht erst notwendig werden zu lassen. Ähnlich wie die Chaoten hören die Systematiker eigentlich nie auf. Wenn man immer vorputzen muss, dann



muss man ja immer in Bewegung bleiben. Es gibt Unterbrechungen, aber nie ein Ende. Eine Interviewpartnerin sagte: „So richtig entspannt war ich nur, als ich im Krankenhaus war.“

*Immerhin halten die Systematiker den Schmutz wirklich in Schach*

Der Systematiker macht sich nicht einmal die Hände schmutzig, weil da, wo er wischt, ja noch gar kein Schmutz ist. Das System ist so weit perfektioniert, dass es gar nicht mehr auffällt, dass es eigentlich eine Beseitigungs- und Vernichtungsarbeit ist. Alles ist ganz geräuschlos und scheinbar gibt es da keine Aggression. Doch bei genauerem Hinsehen stellt sich dann heraus, dass es die eben doch gibt, sie wird bloß auf Nebenschauplätze ausgetragen. Solche Leute fühlen sich etwa bedroht, wenn die Familie oder Besuch nach Hause kommt. Da gibt es dann Regeln, wo die Schuhe ausgezogen werden, wo die Tasche hinarf.

*Der Systematiker verdrängt also seine Aggressivität?*

Einer meiner Interviewpartner sagte, er mache sich erst einmal klassische Klaviermusik an, ehe er mit dem Putzen beginnt. Die ganze Sache soll etwas Kultiviertes haben. Als erstes kommt bei ihm das Parkett dran. Er wienert es mit dem Handbohrer im Takt der Musik. Aus dem Putzen wird eine ästhetische Bewegung. Oder ein anderes Beispiel: Eine Dame putzt jeden Tag eine Stunde lang, ehe sie zur Arbeit geht. Nach einem strengen, bewährten System wird ein Zimmer nach dem anderen saubergemacht. Und was die Wäsche angeht: Um jede Garnitur kommt ein Schleifchen. Weil sie vor der Arbeit putzt, muss sie natürlich irgendwann unterbrechen, aber dazu sagte sie: „Macht nichts, dann werfe ich einen Handschuh vor die Tür, wo ich gerade dran bin und dann weiß ich abends, wie weit ich gekommen bin.“ Da liegt natürlich das Bild vom Fehdehandschuh nahe: „Ich habe dem Dreck den Kampf angesagt. Und es bleibt dabei. Ich gebe nicht auf.“

*Auch hier die Erhaltung des Status quo?*

Ja, bloß auf einem anderen Level als bei den Chaoten. Hier ist das Ziel, eine unberührte, ja unbelebte Wohnung herzustellen. Manche Systematiker gruselt es sogar vor den winzigen Spuren, die das Putzen selbst hinterlässt, etwa Wischstreifen oder Fusseln vom Scheuertuch.

*Ist das pathologisch?*

Beim Thema Putzen und Psychologie fällt jedem der Waschzwang ein. Aber der äußert sich ja meist so, dass jemand ein ganz strenges Ritual hat, das nur einen klitzekleinen Bereich betrifft, etwa die Türklinken oder die Bettwäsche. Das wesentliche ist dann, nicht mit Dreck in Berührung zu kommen. Dann wird Bettwäsche nicht nur einmal sondern fünfmal gewaschen, mit Plastikhandschuhen angefasst und ganz heiß gemangelt. Beim Bettbeziehen streift sich der Betreffende dann ein Kopfkissen über die Arme, legt einen Mundschutz an und bezieht dann erst das Bett. In „Besser geht’s nicht“, einem Film mit Jack Nicholson, gibt es eine typische Szene: Er hat einen großen Stapel Seifen im Toilettenschrank, macht mit dem einen Ellbogen den Hahn auf, mit dem anderen Ellbogen öffnet er den Toilettenschrank, holt eine Seife heraus, packt sie aus, wäscht ganz kurz, wirft die Seife weg, dann kommt die nächste. Das muss er mit fünf bis zehn Seifen machen. Danach zieht er Handschuhe an. Solche Zwangshandlungen unterscheiden sich aber vom systematischen Putzen. Jeder Putztyp kann krankhaft entarten, aber alle haben auch eine normale Ausprägung. Von einer Neurose sollte man erst sprechen, wenn jemand leidet, oder wenn er andere leiden lässt.

*Was ist denn das Motiv beim Waschzwang?*

Solche Leute haben meistens eine extreme Angst vor Berührung. Die Betroffenen fassen sich ja nicht einmal selber an, geschweige denn andere Menschen. Eine starke Beziehungsangst liegt vor, auch Gespräche sind oft nicht möglich, weil es sich ja auch da um „Berührung“ handelt. Deshalb ist der Waschzwang auch schwer zu therapieren, weil ja diese Klienten große Vorbehalte gegen Beziehungen haben; und eine Therapie kann nur funktionieren, wenn ein Kontakt zustande kommen darf und zustrande kommt. Einem Waschneurotiker ist es schon ein Angang, in ein fremdes Zimmer hereinzugehen, und sich dort hinzusetzen. Das ist nur nach langen Ritualen möglich, die dann schon einmal die Hälfte der Sitzung wegnehmen.

*Gibt es beim Putzen einen gesunden Mittelweg zwischen System und Chaos?*

Von Gesundheit oder Krankheit würde ich hier gar nicht sprechen. Aber es gibt in der Tat zwei Mischtypen. Zum einen den Schaukler, der beständig schwankt zwischen Systematik und chaotischem

Herumfuhrwerken. Eigentlich gibt es einen festgelegten Plan, der aber immer wieder zerfleddert. Man fängt im Wohnzimmer an, sammelt die Blätter der Pflanzen ein, Zeitungen, Dreck vom Vogelkäfig, alles ganz systematisch und effektiv – und dann kommt das, was ich als Psychoanalytikerin einen Affektdurchbruch nennen würde: Der Blick fällt auf die verstaubte Heizung. Und auf einmal verschwimmt der Plan, und nur noch die Heizung ist wichtig. Sie wissen vielleicht: Mit einer Heizung kann man sich durchaus zwei Stunden aufhalten, wenn man gründlich ist. Und eben das tut der Schaukler – bis ihm dann wieder der Plan einfällt. Und dann bekommt er einen Schreck und tut wieder das, was zum Plan gehört. Aber trotz massiver Eingrenzungs-bemühungen uferst die Arbeit ständig aus. Und so gibt es hier immer so ein Hin- und Her zwischen systematischer Planerfüllung und plötzlichen Aggressionsschüben. Aber am Ende kommt dann doch noch eine geschlossene Gestalt zustande. Zufriedenheit breitet sich aus: „Holla, das war gut!“ heißt es dann und man trinkt eine Tasse Kaffee. Die Freude am Werk wird durch das immer noch vorhandene Chaos gar nicht gestört, denn die Reste sind willkommene Anknüpfungspunkte für die nächste Aktion. Und ganz ähnlich ist es auch beim Wütenden, dem zweiten Zwischentyp.

*Sie meinen den Putzteufel klassischer Prägung?*

Beim Wütenden hat das Putzen den Charakter eines Anfalls. Der Wütende verspürt eine innere Unruhe und aus dieser Unruhe heraus fängt er an zu putzen. Er fängt etwa bei der Badewanne an, weil da so viele Haare drin liegen. Oder er fegt den Schrank aus. Aber das sind nur kleine Übungen zur Lockerung. Der Kampf wird mit langsam sich steigender Radikalität geführt. Es gibt erste Opfer. Da wird dann auch schon einmal ein Spielzeug mitgesaugt. Dann kommt der Höhepunkt: Schließlich fällt der Blick auf irgendeine Stelle, „wo es sich lohnt“. Vielleicht auf den Urinstein in der Toilette. Der muss beseitigt werden, und der Wütende holt ein scharfes Mittel, das hilft aber nicht. Und dann holt er das Küchenmesser. Wir haben also hier eine stetige Steigerung, und der Wütende gerät in Schweiß. Es geht um den „dicken Dreck“, den „fieses Kniest“, um den „Knös von Jahrhunderten“, wie mir einer sagte. Und nur der ist das Objekt des Wütenden und wenn der beseitigt ist, lehnt sich der Wütende zufrieden zurück und belohnt sich mit einem Whisky.

*Richtig sauber wird es auf diese Weise aber nicht?*

Die Angehörigen diesen Typus haben oft noch eine Putzfrau, die für die regelmäßigen Arbeiten zuständig ist. Die Wütenden geben unumwunden zu, dass es ihnen ums Abreagieren geht. Verschiebung nennt man das. Aber auch dies ist nicht pathologisch. Denn es ist eine sinnvolle Möglichkeit, einen Ärger, den man sich irgendwo eingefangen hat, an einer anderen Stelle abzulassen. Gäbe es solche Mechanismen nicht, dann hätten wir ständig Krieg!

*Wie erkennt man denn, welcher Putztyp man selbst ist?*

Man muss sich über das Motiv klar werden. Warum putze ich? Weil es neun Uhr morgens ist? Oder weil ich mir heute einmal vorgenommen habe, zu putzen? Oder weil ich gerade genervt bin? Oder putze ich, weil ich eigentlich immer putze? Je nachdem bin ich ein Systematiker, ein Schaukler, ein Wütender oder ein Chaot. Auch die Wahl des Putzmittels ist charakteristisch: Die Systematiker setzen zum Beispiel auf altbewährte Putzmittel, die die Gegenstände nicht zu stark angreifen, die Wütenden dagegen benutzen in der Regel Putzmittel, die gerade zur Hand sind, die von anderen angeschafft wurden. Und auch an der Ausgestaltung des Endes des Prozesses kann man sie erkennen: Der Systematiker hören auf, weil es inzwischen zehn Uhr ist, die Schaukler hören auf, weil sie am Ende doch ihren Plan erfüllt haben, die Wütenden sind erschöpft, und die Chaotiker – die hören nie auf.

*Das systematische Putzen ist dann wohl das effektivste?*

Das kann man so nicht sagen. Es geht beim Putzen nicht nur um objektive Sauberkeit. Man putzt, weil man einen Zustand wiederherstellen will, in dem man sich wohlfühlt. Und der wird unterschiedlich definiert. Auch der Chaot ist effektiv, weil er eben genau dasjenige Gleichgewicht aus Ordnung und Unordnung reproduziert, das er braucht.

*Eben deshalb ist wohl auch das Thema „mein Mitbewohner und der Schmutz“ von so großer Bedeutung?*

Schon, der Mitbewohner wird zwangsläufig Teil des Putzgeschehens. Sei es, dass er eingespannt wird, sei es, dass er gemäßregelt wird, weil er etwa die Spülmaschine verkehrt einräumt. Manchmal wird der Mitbewohner auch mitgeputzt.

*So wird das Putzen dann zum Auslöser von Konflikten?*

Sicher können sich Konflikte auch an divergierenden Sauberkeitsvorstellungen entzünden. Aber mit wachsender klinischer Erfahrung würde ich sagen: Über die Unordnung streitet man sich erst, wenn die Beziehung ohnehin aus dem Lot ist. Auch ein Chaot und ein Systematiker können gut miteinander auskommen, der Chaot sorgt dann für lebendige Unordnung. Es ist doch eine elend langweilige Sache, immer in Reinheit zu leben. Man kann das auch als Ergänzung erleben.

*Wie kommt eine Psychologin überhaupt dazu, sich mit banalen Alltagsprozessen wie dem Putzen zu beschäftigen?*

Darauf kam ich durch meinen Professor, den Kölner Psychologen Wilhelm Salber. „Der Alltag ist nicht grau“, war eines seiner Schlagworte – und ist auch der Titel eines seiner Bücher. Salber ist einer der wenigen Psychologen, der ein Interesse für das Thema „Der Mensch und die Dinge“ hat. Sonst befassen sich die Psychologen ja eher mit dem Innerseelischen oder mit dem Zwischenmenschlichen. Salber hat eine Methode der qualitativen Befragung entwickelt, das Tiefeninterview, mit dem man Typen des Umgangs mit Dingen herausbekommen kann.

*Dieses Interesse für den Alltag mit den Dingen ist aber doch eigentlich eher ungewöhnlich in Ihrem Fach?*

Diese Form der Alltagspsychologie knüpft an Traditionen an, die durch das Dritte Reich unterbrochen wurden. Wir hatten ja in Deutschland eine sehr breite, auch philosophische anspruchsvolle qualitative Forschung, die nach dem Ende des Krieges mehr oder weniger in Vergessenheit geraten ist. Heute beherrschen quantitative Methoden das Feld, Zählen und Messen. Manchmal wird gegen qualitative Untersuchungen sogar ins Feld geführt, dass sie gut lesbar und unterhaltsam sind. Viele Leute verwechseln die Wissenschaft wohl doch mit der Kirche.

*Ist das eine Volkskunde mit neuen Mitteln, oder haben solche Untersuchungen auch einen praktischen Zweck?*

Zunächst einmal lassen sich Studien des Alltagslebens gut verwenden für Zwecke der Produktforschung. Wenn man zum Beispiel effektiv für eine Salbe werben will, ist es nützlich, zu wissen, wie viele

unterschiedliche Formen des Sich-Eincremens es eigentlich gibt und aus welchen Gründen sich die Leute überhaupt eincremen. Oder, um beim Thema zu bleiben: Für die Putzmittelindustrie ist es natürlich von hohem Interesse, zu wissen, aus welchen Motiven und auf welche Weisen geputzt wird. Mit quantitativen Methoden kommt man da gar nicht weiter.

*Sie sprachen vom Reiz des Putzens. Wo liegt der Ihrer Meinung nach?*

Wir klagen über die Monotonie des Putzens, aber andererseits schätzen wir es auch, dass es immer weiter geht. Der Prozess läuft sich nicht tot. Zum einen ist es der natürliche Lauf der Dinge, dass immer wieder Unordnung und Schmutz entsteht, aber auch die Putzenden selbst sorgen dafür, dass es immer weitergeht. Das ist der versteckte Sinn des Restlassens. Man schafft immer neue Anfänge. Ein anderer Punkt ist sicherlich der, dass das Putzen Gelegenheit gibt, sich mit Schmutz zu beschäftigen.

*Wollen Sie sagen, dass wir eine heimliche Freude am Schmutz haben?*

Das hört sich vielleicht paradox an. Eigentlich ekeln wir uns vor dem Glitschigen, dem Schmierigen, dem Klebrigen. Aber wenn wir ehrlich sind, übt das Eklige auch eine unerklärliche Anziehungskraft auf uns aus. Schmutz ist sinnlich. Deshalb haben wir ja diese Worte wie „schmutzige Träume“ oder „schmutzige Sexualität“ – das ist ja alles ganz nahe beieinander. Zum Schmutz haben wir ein ambivalentes Verhältnis, er soll einerseits abgeschafft werden, aber andererseits gehen wir auch ganz gerne damit um. Ein Leben ohne Dreck wäre doch stinklangweilig! Natürlich haben wir alle unsere Sozialisation hinter uns, und die hat uns die Freude am Dreck ziemlich ausgetrieben. Deshalb sagen die Leute auch nicht: Ich finde es toll, den Fettschmodder aufzuweichen und aus dem Backofen zu kratzen, sondern es heißt dann: ‚Mir wird warm dabei.‘ Haben Sie schon einmal einen schmutzigen Backofen geputzt? Da wird alles schmutzig, das ist eine Orgie. Nicht nur angenehm, weil man sich dabei bücken und zugleich strecken muss, hinterher ist man immer etwas verknittert. Aber der Spaß am Dreck ist mit von der Partie.

*Was ist denn überhaupt Schmutz?*

Das ist Definitionssache. Es kommt auf die Ordnungsvorstellung an, die man hat, die definiert erst, was Schmutz ist. Je starrer ein Ord-



nungssystem ist, desto mehr Schmutz erzeugt es, je differenzierter, desto mehr Sorten; so formuliert es Christian Enzensberger in seinem „Größeren Versuch über den Schmutz“. Ganz ähnlich ist es mit der Sauberkeit. Auch die hängt von Ihrer Definition ab. Objektiv können Sie nicht definieren, wann eine Wohnung sauber ist. Es gibt strenggenommen gar keine saubere Wohnungen, sondern nur Wohnungen, die als „sauber“ bezeichnet werden. Deshalb ist es ja für den Putzenden so wichtig, Zeichen zu setzen, um sich und anderen zu zeigen, dass man fertig ist. Nach dem Putzen wird die Wohnung fröhlich ausgeflaggt. Eine Frau sagte: „Wenn ich geputzt habe, leg ich einen Aufnehmer vor die Tür. Dann weiß mein Mann, heute hat sie.“

*Das Gespräch mit Elfie Porz führte Jens Soentgen. Eine frühere und gekürzte Fassung dieses Interviews erschien am 11. September 1998 im FAZ-Magazin (Heft 967, S. 44 f.).*

FRANK GRÜNBERG

## DER REINE RAUM

### HOCHSAUBERKEITSTRAKT FÜR HALBLEITER-HIRNE

Mikrochips sind hochsensible Güter. Schon winzige Verunreinigungen in der Umgebungsluft zerstören ihre Oberfläche und führen zu kostspieligen Verlusten. Die Produktion findet daher in so genannten „Reinräumen“ statt, die frei von Staubpartikeln und aggressiven Gasen gehalten werden. Der Mensch gilt als der größte Risikofaktor in diesem Prozess. Dank moderner Filter- und Klimaverfahren muss er um seine Zukunft im Reinraum aber nicht fürchten.

Raucher haben es schwer in der modernen Halbleiterproduktion. Denn die Hersteller von Mikrochips scheuen nicht nur, wie der Teufel das Weihwasser, den Qualm, der beim Rauch ihrer Zigaretten entsteht, sondern auch ihren Atem, der kleine, aber zerstörerische Rußpartikel aus den Lungen bläst. Alle Reinraumarbeiter müssen ihre Körper in luftdichte Ganzkörper-Overalls mit Kapuze hüllen, ihre Hände in sterilen Einmal-Handschuhen verbergen und ihr Gesicht mit einem breiten Mundschutz maskieren, damit weder Haare, noch Schweiß, Speichel oder Hautpartikel in den Produktionsprozess gelangen. Für Raucher gelten darüber hinaus besondere Regeln. „Wir erwarten, dass Mitarbeiter, die im Reinraum tätig sind, zwei Stunden vor Dienstantritt nicht mehr rauchen“, sagt Jörg-Peter Weher, Betriebsleiter bei Advanced Micro Devices (AMD) in Dresden. Weder die morgendliche Nikotinladung auf der Fahrt zur Arbeit noch die schnelle Pausenkippe sind erlaubt. „Bei den 12-Stunden-Schichten, die bei uns üblich sind, können sie also mindestens 14 Stunden pro Tag nicht zur Zigarette greifen.“

Eine lästige, aber notwendige Maßnahme. Schließlich stellen Firmen wie Intel, Infineon oder eben AMD eine heißbegehrte Ware her. Ohne ihre Mikroprozessoren wären Personalcomputer, Mobil telefo-

ne, ja selbst Waschmaschinen nichts anderes als tote Gegenstände aus Kunststoff und Blech, mit denen man weder spielen, schreiben, telefonieren noch verschiedene Waschprogramme laufen lassen könnte. Die „Mini-Hirne“, oft nicht größer als ein Daumnagel, dirigieren heutzutage sowohl die Spritzzufuhr eines Autos als auch den Vorschub einer Drehbank. Auch die Medizintechnik kommt ohne die künstlichen Kleinhirne nicht mehr aus, angefangen beim Herzschrittmacher bis hin zum Hörgerät. Der Wert dieser Kostbarkeiten ist entsprechend hoch. Im Jahr 2004, so schätzen Experten, wird der Chipumsatz auf mehr als 220 Milliarden US-Dollar steigen.

Geld verdienen können die Unternehmen jedoch nur dann, wenn sie keine fehlerhaften Teile produzieren. Schon bei der Planung einer neuen Chipfabrik legen die Architekten daher viel Wert auf nachhaltige Sauberkeit. So auch in der neuen „AMD Fab 36“ in Dresden, die im Jahre 2005 die Produktion aufnehmen soll. 2,5 Milliarden US-Dollar investiert AMD in den Bau der fußballfeldgroßen Halle, in der einmal 1.000 Menschen arbeiten sollen. Doch nur eine der drei Etagen dient der eigentlichen Produktion. „In den beiden anderen Etagen installieren wir leistungsfähige Filter- und Klimaanlage“, erklärt AMD-Manager Weher. „Denn innerhalb der Fertigungsgeräte und Transportboxen herrscht Reinraumklasse 1.“ Sauberer geht es nicht. Diese Sauberkeit kostet Energie, viel Energie. Deshalb baut AMD gleich neben der Fab 36 ein 24-Megawatt-Kraftwerk, um die Halbleiterproduktion rund um die Uhr mit Elektrizität zu versorgen. Zum Vergleich: Diese Leistung wird dem Bedarf einer ganzen Kleinstadt mit 30.000 Einwohnern gerecht.

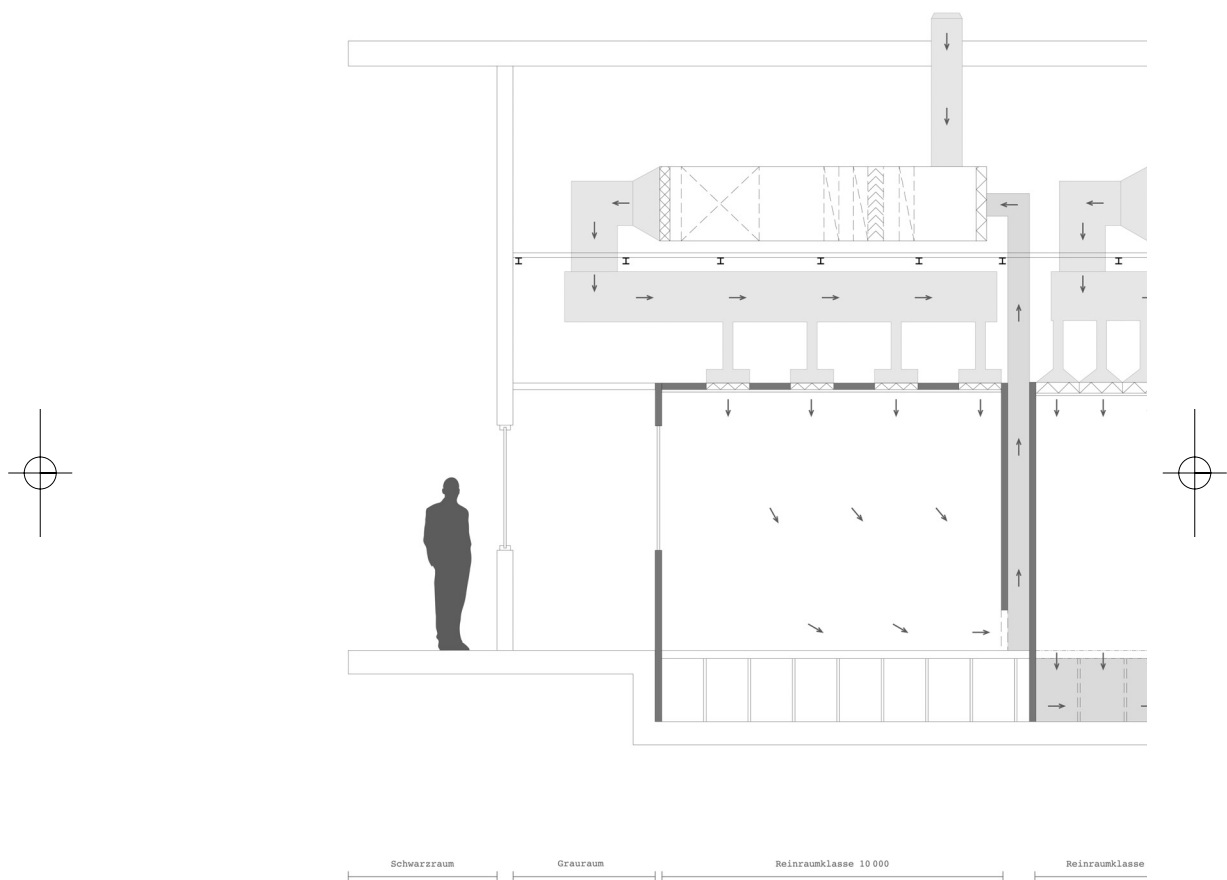
### UNVORSTELLBARE SAUBERKEIT

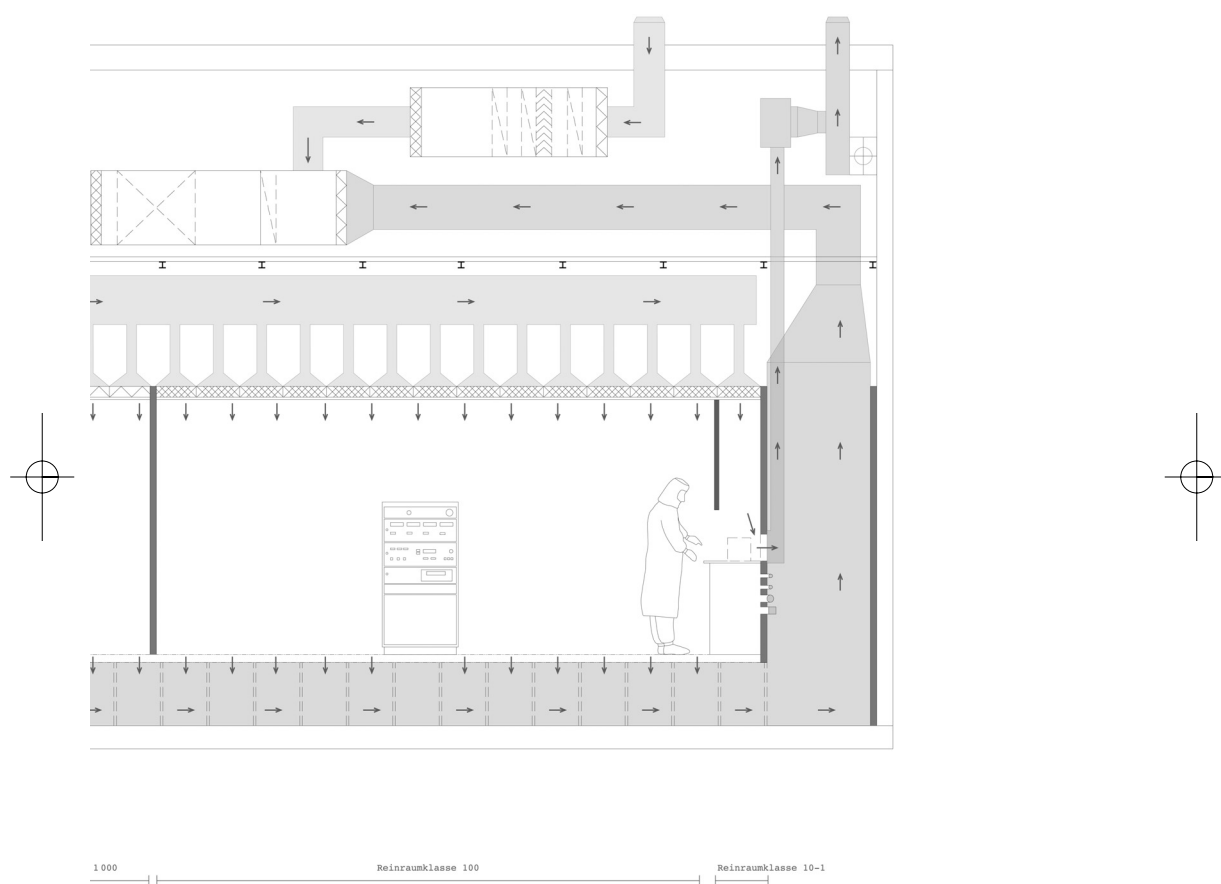
Für diese „Sauberkeit“ gibt es in unserem Alltag keine Vergleiche mehr. In der Reinraumklasse 1 kommt in einem Würfel mit 30 Zentimetern Kantenlänge, der randvoll mit ungefährlichem Gas gefüllt ist, nur noch ein einziges Staubteilchen vor, dessen Durchmesser aber nicht größer ist als ein tausendstel Millimeter. Die menschlichen Sinne reichen nicht aus, um solch geringe Dosierungen überhaupt wahrzunehmen. Schließlich entspräche ein Riesenbau wie das Berliner Olympiastadion erst dann der Reinraumklasse 1, wenn sich in ansonsten reinen Luft von den Katakomben bis zum Dach nur ein einziges Sandkorn finden würde.

In der Halbleiterindustrie müssen die Reinraumtechniker diese Sauberkeit liefern. Zum Beispiel sollen in der „AMD Fab 36“ Mikrochips gefertigt werden, deren stromführende Kanäle nur 65 Nanometer breit sind. Da ein Nanometer einem Millionstel Millimeter entspricht, würden also mehr als 1.000 dieser Leiterbahnen in ein menschliches Haar passen. Diese Feinstruktur macht die Chips nicht nur besonders leistungsfähig, sondern auch besonders kostspielig und anfällig in der Produktion. Etwa 600 aufeinanderfolgende Prozessschritte sind notwendig, um den Chips die vielfältigen Funktionen einzuprägen, die sie im Endzustand erfüllen sollen. In jedem dieser Schritte könnte ein einziges Staubkorn den gesamten Chip zerstören. Die Reinraumtechniker müssen daher dafür sorgen, dass in der Luft möglichst überhaupt kein Staubkorn mehr enthalten ist.

Dabei spiegeln Strukturbreiten von 65 Nanometern, wie sie zunächst in der „AMD Fab 36“ gefertigt werden, den aktuellen Stand der Technik wider. In Zukunft streben die Halbleitertechnologen aber hin zu weit geringeren Dimensionen. So fördert die Europäische Gemeinschaft Forschungsprojekte, die herausfinden wollen, wie sich Mikrochips mit 22 Nanometer breiten Leiterbahnen herstellen lassen. Nach heutigem Kenntnisstand gelten Strukturbreiten dieser Größenordnung als die Grenzen des Machbaren. Allerdings rechnen die Experten fest damit, diese Grenzen zu unterschreiten. Bereits im Jahre 2015, so steht es in der International Technology Roadmap for Semiconductors, dem Fahrplan der internationalen Halbleitertechnologie, soll die Zehn-Nanometer-Hürde genommen werden. Vergleiche mit der menschlichen Haaresbreite verlieren dann ebenso ihre Aussagekraft wie die Gesetze der klassischen Physik. Denn zehn Nanometer entsprechen nur noch etwa 20 Atomdurchmesser. Eine Größenordnung, in denen die Quantenphysik das Kommando über jegliche Vorgänge innerhalb der Leiterbahnen übernimmt.

Doch je winziger die Leiterbahnen, desto größer die Gefahr, dass Partikel, die bislang harmlos schienen, große Schäden anrichten. Zum Vergleich: Ein Kieselstein, der auf eine normale Autobahn fällt, ist zu klein, um die Oberfläche zu zerstören. Schrumpft die Autobahn aber auf die Größe des Kieselsteins zusammen, kann auch der Kieselstein verheerende Wirkungen hervorrufen. Zum Beispiel, indem er die gesamte Fahrbahn unter sich begräbt. Wird die Autobahn noch schmaler, droht irgendwann sogar von einzelnen Sandkörnern Gefahr. Diese Entwicklung erleben – im übertragenen Sinne – auch die





Reinraumtechniker. Sie versuchen mittlerweile, nicht nur Festkörperpartikel aus dem Reinraum herauszuhalten, sondern auch winzige Gasmoleküle.

### **DIE ANFÄNGE ALLER HYGIENE**

Die Reinraum-Pioniere haben sich diese Entwicklung wohl in ihren kühnsten Fantasien nicht träumen lassen. Zwar war bereits in der hippokratischen Medizin des Altertums bekannt, dass Sauberkeit eine fundamentale Voraussetzung für die erfolgreiche Bekämpfung jeglicher Krankheiten ist. Allerdings bekämpfte man damals in erster Linie den sichtbaren Schmutz.

Erst im 19. Jahrhundert begannen die Menschen, sich wissenschaftlich mit Themen wie „Keimfreiheit“ und „Sterilität“ zu beschäftigen. Der englische Chirurg Joseph Lister (1827–1912) definierte die Prinzipien der Antisepsis, indem er davon ausging, dass Keime und Krankheitserreger grundsätzlich überall hingelangen, also auch an den Ort des medizinischen Eingriffs. Deshalb müssten sie, so seine Forderung, vor Ort vernichtet werden.

Die von dem ungarischen Gynäkologen Ignaz Philipp Semmelweis (1818–1865) verfochtene Idee der Asepsis ging einen Schritt weiter. Sie postulierte nicht nur die Vernichtung, sondern vielmehr die Fernhaltung jeglicher Erreger vom Ort der Operation. Semmelweis dachte dabei vor allem an den Transport der Erreger auf den Oberflächen der benutzten Instrumente oder der Haut des beteiligten Personals. Unter dieser Prämisse wurden schließlich erste Reinigungs-, Desinfizier- und Sterilisierverfahren per Dampf- oder Heißluft entwickelt. Doch selbst diese Vorkehrungen reichten nicht, um Seren, Impfstoffe und Antibiotika, die eine nachträgliche Desinfektion nicht mehr erlaubten, steril herzustellen. Mediziner und Pharmazeuten verlangten daher nach neuen Konzepten. In der Folge entstanden die ersten konventionellen Reinnräume, die sich dadurch auszeichneten, dass sie hermetisch von der Außenwelt isoliert waren.

„Drei wesentliche Merkmale kennzeichnete diese Reinraumgeneration“, schreibt Hans-Peter Hortig, ein Pionier der neuzeitlichen Reinraumtechnik in Deutschland, in dem Buch „Reinraumtechnik“. Erstens: Die in den Reinraum einzubringenden Güter und Gegenstände wurden in entsprechender Reinheit eingeschleust. Zweitens: Das Personal konnte den Reinraum erst nach Umkleiden, Waschen und Anlegen spezieller Kleidung betreten. Und drittens: Die zur Be-

lüftung des Reinraums erforderliche Luft wurde hochgradig gereinigt („Sterilfiltriert“), in großen Mengen aus einer Deckendüse eingeblasen, im Raum verwirbelt und am Boden wieder abgesaugt.

Zu Beginn der 1960er Jahre waren diese Reinräume weltweit bereits in großer Zahl in Betrieb. Doch vor allem in der Fertigung von mikroelektronischen Bauteilen zeigte sich bald, dass ein steriler Vorraum nicht ausreichte, um effizient zu produzieren. Diese Erfahrung musste auch die US-amerikanische Weltraumbehörde machen. „Bei der Herstellung von miniaturisierten Bauteilen für die NASA“, berichtet Hortig, „produzierte man in einem konventionellen Reinraum mehr Ausschuss als brauchbare Ware.“

Die Diagnose lautete: Schwebstoffteilchen. Teilchen also, die mit Durchmessern von weniger als einem Mikrometer (das entspricht einem tausendstel Millimeter) mit dem Luftstrom durch die Räume wehten und sich auf noch ungeschützten Halbleitern ablagerten. Guter Rat war teuer, aber nicht verfügbar. Ganz pragmatisch zogen die Reinraumtechniker daher zunächst einmal die als kritisch erachteten Arbeitsplätze direkt vor die Deckendüse, die die gefilterte Luft in den Reinraum blies. Der unverwirbelte, in der Strömungslehre auch als „laminar“ bezeichnete Wind sollte den Staubpartikeln erst gar keine Gelegenheit bieten, sich auf den in Produktion befindlichen Mikrochips einzunisten.

Tatsächlich funktionierte die Idee – und der Ausschuss sank. Die Mitarbeiter allerdings klagten nun über unerträgliche Zugluft. Glücklicherweise blieb die Ausbeute aber auch bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten konstant, sodass der Urahn des modernen Hochsauerkeitstraktes geboren war und die systematische Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Klimatechnik und Kontamination begann.

### **MODERNE REINRÄUME**

Als größter „Luftverpester“ stand vor allem der Mensch im Mittelpunkt der Forschungen. Frühe Studien zeigen, dass er selbst dann, wenn er in Ganz-Körper-Anzüge, Atemmasken und Handschuhen verpackt lediglich ruhig sitzt oder steht, rund 100.000 Staubpartikel pro Minute freisetzt. Schon geringfügige Aktionen wie leichtes Kreisen mit dem Arm oder langsames Gehen erhöhen die Emissionsrate auf eine Million Partikel pro Minute. Ganz zu schweigen von schnellen Bewegungen, durch die der Mensch zehn Millionen Teilchen pro Minute und mehr an seine Umgebung abgibt.



Tab.1: Richtwerte für die Teilchen-Emission eines Menschen in Reinraumkleidung  
Quelle: Gail und Hortig (2002)

Bewegungsart	Partikel >0,3µm/min
Ruhig Stehen oder Sitzen	1 x 10 <sup>5</sup>
Sitzen, leichte Armbewegung	1 x 10 <sup>6</sup>
Langsam Gehen	1 x 10 <sup>5</sup>
Schnelle Bewegung	1 x 10 <sup>7</sup> und mehr

Gleichzeitig blieb, wie bereits erwähnt, die Geschwindigkeit, mit der die Luft durch den Reinraum strömen durfte, aus arbeitsmedizinischen Gründen beschränkt. Damit ließ sich auch der Takt, in dem das Luftvolumen des Reinraums ausgetauscht werden konnte, nicht beliebig steigern. Die Folge: Die Staub-Konzentration in der Luft eines von Menschen genutzten, konventionellen Reinraumes ließ sich auf maximal 1.000 Partikel pro Liter verringern. „Dreckig“ war die Luft damit zwar keineswegs. Doch vor allem in der Halbleiterindustrie, die sich gerade anschickte, das digitale Zeitalter einzuläuten, wurde diese Luftqualität den wachsenden Anforderungen nicht mehr gerecht.

Die Reinraumtechniker lernten schnell, dass es nicht den einen, universellen Reinraum für alle Anwendungen geben konnte. Mehr und mehr verstanden sie, Maschinen und Personal der Aufgabenstellung entsprechend zu positionieren. Außerdem versuchten sie, Strömungshindernisse so weit wie möglich zu vermeiden und alle Arbeitsgeräte auf eine optimale Aerodynamik zu trimmen. Beispielsweise perforierten sie die Oberflächen von Arbeitstischen und Maschinen wie Siebe, damit die Luft ohne große Verwirbelungen durch sie hindurchströmen konnte.

Darüber hinaus stellten die Ingenieure fest, dass es wesentlich günstiger war, die Luft durch die gesamte Decke einzublasen statt nur über eine einzige Düse. Mit diesem Trick verringerten sie die Kontaminationsrate gleich um zwei Größenordnungen auf nur noch zehn Teilchen pro Liter. Was gleichzeitig allerdings stieg, waren die Investitionskosten. Denn nun mussten riesige Ventilatoren die erforderlichen Luftmengen in die Reinräume drücken, während leistungsstarke Kühlaggregate und Schalldämpfer den Lärm und die Temperatur, die die Ventilatoren der Luft mit auf den Weg gaben, wieder auf ein für Menschen erträgliches Maß herunterpegelten.

Doch auch hier fand sich eine Lösung. Statt den gesamten Reinraum auf ein hohes Reinheitsniveau zu bringen, isolierten die Reinraumtechnologien die kritischen Arbeitsplätze durch zusätzliche Vorhänge, die von der Decke herabhängend, den Arbeitstisch von der Umgebung abschotteten. Nur in diesen „Mini-Environments“ erzeugten sie die ultrasaubere Luft, während sie sich im Rest des Reinraumes mit schmutzigeren Verhältnissen zufrieden gaben. Hörtig bringt die Bedeutung der Mini-Environments wie folgt auf den Punkt. „So entstanden Zonen unterschiedlicher Sauberkeit, die Reinheit und Wirtschaftlichkeit optimal miteinander verbinden und noch heute gültig sind.“

Zusätzlich wurde die Produktionskette in der Halbleiterindustrie weitgehend automatisiert. Die staubsensiblen Prozessschritte wie die Belichtung, die Bedampfung und das Ätzen laufen in vielen Fabriken heute in geschlossenen Fertigungsgeräten und Transportboxen ohne direkte Beteiligung des Menschen ab. Zwar verrichten Reinraumarbeiter weiterhin auch körperlich anstrengende Tätigkeiten, wenn sie beispielsweise beim Tragen der etwa 15 Kilogramm schweren Boxen ins Schwitzen geraten, ohne sich ihrer Kleidung entledigen oder ein Fenster in den tageslichtslosen, vollklimatisierten Räumen öffnen zu können. Allerdings dürfen sie sich insgesamt wieder relativ frei bewegen und selbst kleine Sägearbeiten dank der Mini-Environments vor Ort erledigen. „Die Zukunft des Menschen im Reinraum wird wieder wahrscheinlicher“, sagt Martin Schottler, Reinraumexperte des Stuttgarter Unternehmens M+W Zander. „Mensch und Produkt sind heute so konsequent voneinander getrennt, das selbst die Bekleidungs Vorschriften gelockert werden können.“

### **MOLEKULARE VERUNREINIGUNGEN**

Auch die fortschreitende Miniaturisierung stellt den Menschen im Reinraum nicht mehr in Frage. Denn das Filtern selbst kleinster Staubpartikel gilt heute als gängige Kunst, da die Anforderungen an Partikelfilter nicht ins Endlose steigen, wenn die Partikel kleiner werden. Vielmehr verfügen winzige Festkörper über so genannte Van-der-Waals-Kräfte, die sich nutzen lassen, um die Partikel im Filtervlies zurückzuhalten. Diese Kräfte sind beispielsweise der Grund dafür, dass Kreidestaub an der Tafel haftet und nicht gleich auf die Erde rieselt.

Die neue Herausforderung, der sich die Reinraumtechniker stellen müssen, sind daher nicht mehr feinste Festkörper wie Ruß oder Staub, sondern gasförmige Verunreinigungen. Sowohl in der Produktion von Mikrochips als auch in der Fertigung von Festplatten beobachten Fachleute, dass die Schäden durch diese Kontaminationen zunehmen. „Diese Art von Schädigungen sind an sich nicht neu,“ sagt Reinraumexperte Schottler. „Sie sind in den letzten Jahren aufgrund der abnehmenden Strukturbreiten aber in den Vordergrund gerückt.“

Herkömmliche Filter können die Moleküle nicht zurückhalten. Ungehindert dringen sie an die Oberfläche halbfertiger Bauelemente vor und werden dort aktiv. Beispielsweise verwandeln sie sich durch chemische Reaktion in einen Feststoff, der anschließend die Oberfläche zerstört oder ins Innere des Mikrochips wandert. In beiden Fällen steht die Funktionsfähigkeit des Chips auf dem Spiel.

Einer der berüchtigtsten Störenfriede in diesem Zusammenhang ist der Ammoniak, ein stechend riechendes Gas, das beispielsweise aus der Gülle in die Umgebungsluft entweicht. Dringt der Ammoniak selbst in Konzentrationen, die weit unterhalb jeglicher Gesundheitsgefährdung des Menschen liegen, in den Reinraum ein, greift er dort den Fotolack an, der bei der Produktion von Mikrochips zum Einsatz kommt. Die Folge: Der Fotolack verliert seine mechanische Stabilität und liefert schwammige statt scharfe Konturen. Da das Problem aber seit längerem bekannt ist, gibt es mittlerweile spezielle Anti-Ammoniak-Filter, durch die sich die Konzentration dieses Gases hinreichend verringern lässt.

Davon kann bei den Kohlewasserstoffen noch nicht die Rede sein. Diese Moleküle reagieren mit den Halbleiteroberflächen zu Legierungen, die die elektrischen Eigenschaften der Mikrochips verändern. Bei Hochtemperaturprozessen können sie außerdem zu Kohlepartikeln verdampfen, die sich auf dem Chip ablagern und die weiteren Prozessschritte gefährden. Das Problem dabei: Kohlenwasserstoffe treten in der Luft in so großen Mengen auf, dass es momentan keine rationelle Filtermethode gibt. Denn herkömmliche Kohlefilter verlieren ihre Funktionsfähigkeit, wenn das Gewicht der gefilterten Kohle ein Zehntel ihres Eigengewichtes übersteigt. Selbst in Mini-Environments müssten dieser Regel folgend Kohlefilter mindestens 20 Kilogramm wiegen, um die Zellen kohlenstofffrei zu halten. „Ein solcher Filter aber lässt sich dort kaum unterbringen“, erklärt Schottler. „Denn der hätte einen so großen Widerstand, dass man die Luft nicht mehr

einfach so hindurchsaugen könnte.“ Firmen wie M+W-Zander forschen daher an Alternativen.

### **JENSEITS DER HALBLEITERTECHNOLOGIE**

Die Halbleitertechnologie wird wohl auch in Zukunft der Motor für die Weiterentwicklung von Reinräumen bleiben. Angrenzende Wissenschaften wie die Oberflächentechnologie stoßen zwar ebenfalls mehr und mehr in atomare Größenordnungen vor. Die Verfahren, mit denen sich die Eigenschaften von Oberflächen durch Beschichtung unter Reinraumbedingungen optimieren lassen, sind aber noch nicht entwickelt. In der Pharmaindustrie wiederum spielt die Miniaturisierung der Produkte eine untergeordnete Rolle. Denn die gefährlichen Keime, die diese Branche dank der Reinraumtechnik seit Jahrzehnten erfolgreich von ihren Arzneimitteln fernhalten konnte, verändern ihre Größe nicht mit dem technologischen Fortschritt. Nichtsdestoweniger könnte vor allem die Lebensmittelbranche von den Erfahrungen der Pharmaunternehmen profitieren. Sie will in Zukunft verstärkt keimfreie Reinräume nutzen, um bei der Lebensmittelproduktion auf chemische Konservierungstoffe oder eine Vitamine zerstörende Wärmebehandlung zu verzichten. Weitere Branchen, glaubt Lothar Gail, der Vorsitzende des Fachausschusses Reinraumtechnik beim Verein Deutscher Ingenieure (VDI), werden diesem Beispiel folgen. „Der Markt für Reinraumtechnik“, prophezeit er, „wird mit Sicherheit weiter wachsen.“

### **LITERATUR**

GAIL, Lothar und Hans-Peter HORTIG (Hrsg.): Reinraumtechnik, Düsseldorf 2002.

Staub - Spiegel der Umwelt / hrsg. von Jens Soentgen und Knut Völzke. - 1. Aufl. . - München : oekom-Verlag, 2006. - 272 Ill. . - ISBN: 3-936581-60-6. - (Stoffgeschichten ; 1) <http://www.oekom.de/buecher/buchreihen/stoffgeschichten/buch/staub>.

## Teil III: Anhang

Staub - Spiegel der Umwelt / hrsg. von Jens Soentgen und Knut Völzke. - 1. Aufl. . - München : oekom-Verlag, 2006. - 272 Ill. . - ISBN: 3-936581-60-6. - (Stoffgeschichten ; 1) <http://www.oekom.de/buecher/buchreihen/stoffgeschichten/buch/staub>.

## GLOSSAR

*Dies ist kein Lehrbuch, daher haben wir Fachausdrücke eher gemieden, oder, wo sie unumgänglich waren, gleich an Ort und Stelle erklärt. Eine kurze Liste von einfachen Erläuterungen mag als Gedächtnishilfe von Nutzen sein.*

### AEROSOL

Feinst verteilte Feststoff- oder Flüssigkeitsteilchen in Luft oder anderen Gasen. Aufgrund ihrer geringen Größe (0,001-100  $\mu\text{m}$ ) bleiben Aerosole längere Zeit in der Schwebe. Erscheinungsformen sind u.a. Rauch, Staub, Dunst, Nebeltröpfchen, Bakterien oder Pollen.

### ALVEOLEN

Lungenbläschen, in denen der Gasaustausch stattfindet. Das Blut nimmt durch die dünnwandigen, mit einem weitverzweigten Kapillarnetz überzogenen Lungenbläschen Sauerstoff auf und gibt Kohlendioxid und Wasser ab.

### ANTHROPOGEN

Vom Menschen verursacht.

### ATMOSPÄRE

Die Lufthülle der Erde, deren Dichte mit steigender Höhe kontinuierlich abnimmt.

### BIOGEN

Durch Tätigkeit von Lebewesen, ohne Beeinflussung durch den Menschen entstanden.

### CHEMISCHE ANALYSE

Sämtliche Methoden, mit denen Stoffgemische getrennt und hinsichtlich ihres Aufbaus aus Elementen und Verbindungen untersucht werden.

### ELEKTRONENMIKROSKOP

Gerät zur vergrößernden Betrachtung kleinster Teilchen, das im Gegensatz zum Lichtmikroskop (-> Lichtmikroskop) nicht Licht, sondern Elektronenstrahlen zur Abbildung verwendet. Da deren Wellen-



länge mindestens 10.000 mal kleiner ist als die des Lichts, gestatten Elektronenmikroskope gegenüber dem Lichtmikroskop eine bis zu 1000fach größere Bildauflösung. Untersuchungsobjekte lassen sich damit bis zum Faktor 500.000 vergrößern. E. Ruska und M. Knoll konstruierten 1931 das erste Elektronenmikroskop.

#### EMISSION

Von Anlagen, Fahrzeugen oder Produkten an die Umwelt abgegebene Luftverunreinigungen.

#### EPIDEMIOLOGIE

Wissenschaft von der Entstehung, Verbreitung, Bekämpfung und von den sozialen Folgen von Epidemien, zeittypischen Massenerkrankungen und Zivilisationsschäden.

#### FULLEREN (PLURAL FULLERENE)

Als Fulleren bezeichnet man eine Gruppe von Kohlenstoffmakromolekülen. Sie stellen neben Diamant und Graphit die dritte bislang bekannte Element-Modifikation des Kohlenstoffs dar. Die erste Veröffentlichung zu Fullerenen erfolgte am 1985 in der Zeitschrift Nature. Die Entdecker der Fullerene Robert F. Curl jr. (USA), Sir Harold W. Kroto (England) und Richard E. Smalley (USA) erhielten 1996 den Nobelpreis für Chemie. Die bekanntesten und stabilsten Vertreter haben die Summenformeln C<sub>60</sub>, C<sub>70</sub>, C<sub>76</sub>, C<sub>80</sub>, C<sub>82</sub>, C<sub>84</sub>, C<sub>86</sub>, C<sub>90</sub>, C<sub>94</sub>. Das mit Abstand am besten erforschte ist C<sub>60</sub>, wird zu Ehren des Architekten Richard Buckminster Fuller auch Buckminster-Fulleren genannt, da es den von ihm konstruierten Kuppeln ähnelt. Es besteht aus 12 Fünfecken und 20 Sechsecken. Da ein Fußball die gleiche Struktur hat, wird es auch Fußballmolekül (oder auf Englisch Bucky Ball) genannt.

#### IONEN

Elektrisch geladene Atome oder Moleküle, durch Aufnahme oder Abgabe von Elektronen negativ (Anionen) beziehungsweise positiv (Kationen) geladen.

#### KATALYSE

Von dem griechischen Wort *katálysis* (= Auflösung, Umsturz) abgeleitete Bezeichnung für die Beeinflussung der Geschwindigkeit einer

chemischen Reaktion durch die Gegenwart eines Stoffes, des sogenannten Katalysators. Man unterscheidet die homogene Katalyse, bei der der Katalysator und das Reaktionssystem der gleichen Phase angehören (z. B. flüssiger Katalysator in flüssiger Reaktionsmischung gelöst) von der heterogenen Katalyse, bei der der Katalysator im allgemeinen als Feststoff vorliegt, das heißt, die Reaktanden und der Katalysator sind einander berührende, jedoch verschiedene Phasen. Der Autokatalysator funktioniert nach dem Prinzip der heterogenen Katalyse.

#### KLIMA

Begriff für die Gesamtheit der atmosphärischen Zustände und Erscheinungen, die an einem bestimmten Ort oder in einer bestimmten Gegend während längerer Zeiträume beobachtet worden sind.

#### KOLLOIDE

In der Chemie übliche Bezeichnung für Teilchen, deren Größe zwischen 1 Nanometer und etwa 1.000 Nanometer liegen. Für Kolloide gilt, daß die Zahl der energiereichen Oberflächenatome oder Oberflächenmoleküle nicht mehr gegen die Zahl der Atome im Inneren vernachlässigt werden kann. Der Terminus Kolloide geht auf T. Graham (1861) zurück, dieser nannte so Stoffe, die in wäßriger Lösung nicht oder nur sehr langsam durch eine Membran wandern können.

#### LICHTSTREUUNG

Richtungsänderung von Lichtstrahlen, verursacht durch Hindernisse auf der Bahn der Lichtstrahlen.

#### LICHTMIKROSKOP

Gerät zur vergrößernden Betrachtung kleiner Teilchen, das für die Abbildung Lichtstrahlen verwendet. Lichtmikroskope arbeiten mit mehreren Sammellinsen (Objektiv und Okular). Ihr Auflösungsvermögen wird durch die Wellenlänge des Lichtes begrenzt. Der übliche Vergrößerungsbereich liegt zwischen dem 30- und 1.300fachen. Um 1600 baute und verwendete Antoni van Leeuwenhoek die ersten Geräte.

#### LOTOS-EFFEKT

Der sogenannte Lotos-Effekt läßt Wasser von den Blättern mancher

Pflanzen wie Lotosblume, Akelei, Kohl, Kapuzinerkresse oder Schilf abperlen und nimmt dabei Schmutzteilchen von der Blattoberfläche. Den Lotos-Effekt, der auf einer besonderen Rauigkeit der Außenschicht zusammenhängt, gibt es auch bei Tieren: Mit seiner Hilfe bleiben viele Käferarten ständig sauber, obwohl sie im Erdreich leben oder durch verwesende Tierkörper krabbeln. Der Lotos-Effekt wurde von dem Botaniker Wilhelm Barthlott 1975 (an Kapuzinerkresse) entdeckt und aufgeklärt, ab Mitte der 90er Jahre wurde das physikochemische Phänomen auch technisch umgesetzt. Als Markenbezeichnung für die entwickelten superhydrophoben (extrem wasserabweisenden) mikro- und nanostrukturierten Oberflächen wurde von Barthlott die Bezeichnung Lotos-Effekt gefunden und als Markenzeichen angemeldet.

#### MASSENSPEKTROMETER

Gerät zur Bestimmung der Masse von Atomen und Molekülen sowie der Massenhäufigkeit in Substanzgemischen. Massenspektrometer setzen elektrische und magnetische Felder ein, um unterschiedliche chemische Verbindungen in einem Gemisch voneinander zu trennen, zu identifizieren und mengenmäßig zu bestimmen. Die Methode eignet sich u.a. für quantitative Untersuchungen von Gasen und Flüssigkeiten, als Verfahren zur Altersbestimmung oder zur qualitativen Analyse chemischer Verbindungen. 1910 baute J.J. Thompson den ersten Massenspektrographen.

#### MESOSPHERE

In etwa 50 bis 80 Kilometer Höhe liegende Schicht der Erdatmosphäre.

#### MILLI

Vorsatz vor Einheiten im Messwesen für den Faktor  $10^{-3}$  (den tausendsten Teil).

#### MILLIMETER (MM)

1 mm =  $10^{-3}$  Meter = 0,001 Meter.

#### MIKRO

Vorsatz vor Einheiten im Messwesen für den Faktor  $10^{-6}$  (den millionsten Teil).

#### MIKROMETER ( $\mu\text{m}$ )

1  $\mu\text{m}$  =  $10^{-6}$  Meter = 0,000001 Meter.

#### MOLEKÜL

Baustein eines chemischen Elements oder einer chemischen Verbindung. Moleküle bestehen aus Atomen, welche entweder derselben Sorte oder aber unterschiedlichen Sorten angehören.

#### NANO

Vorsatz vor Einheiten im Messwesen für den Faktor  $10^{-9}$  (den milliardsten Teil).

#### NANOMETER (nm)

1 nm =  $10^{-9}$  Meter = 0,000000001 Meter.

#### NANOTUBES

Kohlenstoff-Nanotubes wurden 1991 von dem Japaner Sumio Iijima entdeckt. Es handelt sich um Kohlenstoffmoleküle in Form langer Röhren mit Durchmessern von einem bis mehreren Nanometern. Sie können sowohl Halbleiter wie auch Leiter sein, gehören zu den Materialien mit der höchsten Wärmeleitfähigkeit überhaupt und sind fester als Stahl.

#### PARTIKEL

Kleine Teilchen natürlicher Herkunft (z. B. Wüstensand, Pollen, Meersalz) oder durch den Menschen verursacht (z. B. Dieselmotorabgase, Reifenabrieb, Baustaub).

#### POLLEN, POLLENKORN

Die in den Staubblättern der Blütenpflanzen enthaltenen, mikroskopisch kleinen Verbreitungseinheiten, aus denen die männlichen Geschlechtskeime hervorgehen.

#### PM<sub>2,5</sub>

Partikel mit einer Korngröße bis 2,5 Mikrometer ( $\mu\text{m}$ ). Sie sind so klein, dass sie am Kehlkopf vorbei bis in tiefere Lungenabschnitte und von dort aus sogar in den Blutkreislauf vordringen können.

#### PM<sub>10</sub>

Partikel mit einer Korngröße bis 10 Mikrometer ( $\mu\text{m}$ ). Sie gelangen aufgrund ihrer geringen Größe bis in tiefere Lungenabschnitte.

#### PPB

parts per billion (= ein Teil auf eine Milliarde Teilchen).

#### PPM

parts per million (= ein Teil auf eine Million Teilchen).

#### PRIMÄRE PARTIKEL

Staubteilchen, die direkt als Partikel in die Luft gelangen.

#### RASTERELEKTRONENMIKROSKOP

Spezialtyp eines Elektronenmikroskops (-> Elektronenmikroskop), der sich für die Untersuchung von Oberflächen eignet. Das Gerät arbeitet mit Elektronenstrahlen, die Punkt für Punkt über das Untersuchungsobjekt geführt werden. Selbst bei Vergrößerungen um das 200.000fache liefert es noch scharfe Bilder. 1937 konstruierte M. v. Ardenne das erste Exemplar.

#### RASTERKRAFTMIKROSKOP

Spezialtyp eines Rastertunnelmikroskops (-> Rastertunnelmikroskop). Das Gerät kommt u.a. bei Proben zum Einsatz, die nicht elektrisch leitfähig sind. Wie Rastertunnelmikroskope arbeiten auch Rasterkraftmikroskope mit einer hauchfeinen Metallsonde. Beim Rasterkraftmikroskop berührt diese die Oberfläche des Untersuchungsobjektes und tastet sie schrittweise ab. Mittels des Geräts gelang es F. Giessibl und J. Mannhart im Jahre 2000, erstmals in das Innere eines Atoms zu blicken.

#### RASTERTUNNELMIKROSKOP

Spezialtyp eines Elektronenmikroskops (-> Elektronenmikroskop), das Oberflächenabbildungen mit großer Tiefenauflösung ermöglicht. Selbst atomare Strukturen lassen sich damit sichtbar machen. Das Gerät führt eine hauchfeine Metallsonde fast bis zur Oberfläche des Untersuchungsobjektes heran, so dass durch den sogenannten Tunneleffekt ein Elektronenstrom fließt. G. Binnig und H. Rohrer erfanden die Methode 1982.

#### RÖNTGENBEUGUNG

Zerstörungsfreies Verfahren zur Bestimmung von Kristallstrukturen und Untersuchung unbekannter Substanzen. Selbst kleinste Materialmengen lassen sich damit identifizieren. Das Prinzip: Treffen Röntgenstrahlen auf Kristalle, werden sie je nach Substanz charakteristisch gebeugt. W.H. Bragg und W.L. Bragg entwickelten um 1915 die technischen Grundlagen des Verfahrens.

#### RÖNTGENFLUORESZENZANALYSE

Zerstörungsfreies Verfahren zur Identifizierung und mengenmäßigen Bestimmung der Zusammensetzung fester Untersuchungsproben. Die Atome der Probe werden mit kontinuierlicher Röntgenstrahlung angeregt und senden dadurch ein für jedes Element charakteristisches Linienspektrum aus. Die Methode geht auf Versuche von R. Glocker und H. Schreiber aus den Jahren 1929 zurück.

#### SEKUNDÄRE PARTIKEL

Staubteilchen, die sich erst in der Atmosphäre aus Vorläufergasen (v.a. Schwefeldioxid, Stickoxide, Ammoniak oder flüchtige organische Verbindungen) bilden.

#### SPOROPOLLENIN

Säure- und laugenresistentes Biopolymer, aus dem die sogenannte Exine, die äußere Schicht der Pollenzellwand aufgebaut ist.

#### STAUB

In der Luft schwebende, feste Teilchen von beliebiger Form und Struktur. Staub gehört zu den Aerosolen (-> Aerosol). Er ist in unterschiedlichster Konzentration praktisch immer in der Umgebungsluft enthalten, sowohl in geschlossenen Räumen als auch in der freien Atmosphäre. Der meiste in die Atmosphäre gelangende Staub ist natürlicher Herkunft und stammt aus den Gesteinen und Böden der Trockengebiete unserer Erde. Künstliche Staubquellen sind v.a. Industrieanlagen, die fossile Brennstoffe verfeuern, aber auch Zementfabriken, Hüttenbetriebe oder Sägewerke. Je nach Korngröße wird zwischen Grobstaub (Teilchen größer als 10 Mikrometer), Feinstaub (Teilchen zwischen 1 und 10 Mikrometer) und Feinstaub (Teilchen kleiner als 1 Mikrometer) unterschieden. Ein gesundheitliches Problem sind vor allem Fein- und Feinstäube, die beim Einatmen auf-

grund ihrer geringen Größe bis in die Lungenbläschen gelangen und von dort aus selbst in den Blutkreislauf vordringen können.

#### STAUBNIEDERSCHLAG

Grobkörniger Staub in der Atmosphäre, der zu Boden sinkt.

#### STRATOSPHERE

Teilschicht der Atmosphäre in einer Höhe von etwa 12-50 Kilometer über der Erde.

#### STEREOMIKROSKOP

Spezialtyp eines Lichtmikroskops (-> Lichtmikroskop), das dreidimensionale plastische Bilder in 6- bis 40facher Vergrößerung liefert. Der räumliche Effekt entsteht durch den Einsatz von je zwei Okularen und Objektiven. Das von der Firma Carl Zeiss hergestellte Gree-noughsche Doppelmikroskop – der Prototyp des Stereomikroskops – kam 1895 erstmals zum Einsatz.

#### TRANSMISSIONSMIKROSKOP

Spezialtyp eines Elektronenmikroskops (-> Elektronenmikroskop), mit dem sich Vergrößerungen um das 500.000fache erzielen lassen. Das Gerät setzt allerdings ein ausgesprochen dünnes Probenmaterial voraus, das die aufgestrahlten Elektronen vollständig durchdringen müssen. Die Erfindung geht auf E. Ruska und B. v. Borries Anfang der 1930er Jahre zurück.

#### TROPOSPHERE

Die unterste, bis zu einer Höhe von 12 Kilometer reichende, wetter-wirksame Luftschicht der Erdatmosphäre.

#### WETTER

Augenblicklicher Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort oder in einer bestimmten Gegend.

Das Glossar wurde erstellt von Luitgard Marschall und Jens Soentgen.

ZUSAMMENGESTELLT VON JENS SOENTGEN

## ÜBER DEN STAUB – EINE ZITATENSAMMLUNG

### STAUB ALS MEMENTO MORI

„Im Schweiß deines Angesichts sollst du dein Brot essen, bis du zurückkehrst zum Ackerboden, von ihm bist du ja genommen. Denn Staub bist du, zu Staub mußt du zurück.“

*Genesis 3,19*

„Entropie: Alter der Dinge.

Vermehrung dessen, was sich nicht mehr verwandeln kann.

Asche.“

*Paul Valéry (1871–1945)*

„Eine dünne Staubschicht ist ein Zeichen der Nachlässigkeit, der Beginn der Verwahrlosung. Sie ist der unwägbare Niederschlag der Luft, die man einatmet, der Kleider, die flattern, des Windes, der durch das offene Fenster hereinstreicht. Eine Staufflocke aber stellt schon ein zweites Staubstadium, den sieghaften Staub dar, eine Verdichtung, die Form gewinnt, einen Niederschlag, der zum Kehricht wird.“

*Colette Audry (1906–1990): On joue perdant*

„Waschen, bügeln, fegen, die Staufflöckchen unter den Möbeln hervorkehren, damit hält man zwar den Tod auf, kommt aber nicht zum Leben.“

*Simone de Beauvoir (1908–1986): Das andere Geschlecht.*



## WELTEN IM STAUBKORN

„Nirgendwo ist die ganze Natur der Dinge größer als im Kleinsten.“

*Plinius der Ältere (23–79 n. Chr.)*

„Es gibt keinen Grund, weshalb Gott nur gerade denjenigen Grad der Unendlichkeit und die Art von Größen, die unsre Objekte ausmachen und unsrem Verstand entsprechen, hätte erschaffen sollen, während sich doch leicht denken läßt, daß in dem kleinsten Stäubchen eine Welt existieren kann, in der alles dieser großen Welt entsprechend angeordnet ist, und daß umgekehrt unsre Welt nichts andres ist, als ein Stäubchen einer andren, unendlich größeren.“

*Johann Bernoulli (1667–1748) an Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716), in einem Brief vom 5. Juli 1698*

„So ist es denn möglich, ja notwendig, daß in den kleinsten Stäubchen, ja, in den Atomen, Welten vorhanden sind, die der unsrigen an Schönheit und Mannigfaltigkeit nichts nachgeben; auch hindert nichts – was noch wunderbarer erscheinen könnte – daß die Lebewesen, wenn sie sterben, in derartige Welten übergehen; denn ich bin der Ansicht, daß der Tod nichts andres ist, als die Zusammenziehung des Geschöpfes, sowie die Zeugung nichts andres als seine Entwicklung darstellt.“

*Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) an Johann Bernoulli (1667–1748), in einem Brief vom 18. November 1698*

„Jedes Materiepartikel kann als ein Garten voller Pflanzen und ein Teich voller Fische aufgefaßt werden. Aber jeder Zweig der Pflanze, jedes Glied des Tieres, jeder Tropfen seiner Körpersäfte ist noch ein solcher Garten oder ein solcher Teich.“

*Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716)*

„Der Welten Kleines auch ist wunderbar und groß, und aus dem Kleinen bauen sich die Welten.“

*Spruch auf der Dissertation und auf dem Grabmal des Biologen Christian Gottfried Ehrenberg (1975–1876)*

„Denn das unendlich Kleine ist dem unendlich Großen gleichwertig.“

*Maurice Maeterlinck (1862–1949): Das Leben der Ameisen*

## DAS KLEINE UND DAS GROSSE

„Wo find' ich mich?  
Wie groß ist Gott – wie klein bin ich!  
Denk nur, was ist ein Stäubelein  
Im hellen Sonnenschein!  
Wie, sollt ich mich nicht selbst und alle Ding' vergessen  
Da ich stets leb und schweb im Wesen unermessen?  
Du Liebeswesen bist mir näher als ich mir,  
Drum denk' ich nur an dich und überlass mich dir;  
Verschling das Meine ganz, o Sonne,  
Dein'r Liebe Luft sei meine Wonne  
Dein'r Naheit Licht mein Sonnenschein  
Und meine Seel dein Stäubelein!“  
*Gerhard Tersteegen (1697–1769)*

“To see a World in a Grain of Sand  
And a Heaven in a Wild Flower  
Hold Infinity in the Palm of Your Hand  
And Eternity in an Hour”  
*William Blake (1757–1827)*

„Wir wollen es nicht als selbstverständlich hinnehmen, dass das Leben  
sich voller in dem entfaltet, was man gewöhnlich für groß hält, als in  
dem, was man gewöhnlich für klein hält.“  
*Virginia Woolf (1882–1941)*

„Gesetzt, es wäre erreichbar, alle Eigenschaften eines Sandkorns zu  
ergründen, hätte man damit das gesamte Universum erforscht?“  
*Alexander Moszkowski (1851–1934)*

Einstein erklärte, daß diese Frage mit einem unbedingten Ja beantwortet werden müsse: „Denn, würde man wissenschaftlich das Geschehen in einem Sandkorn vollständig beherrschen, so wäre dies nur möglich auf Grund der Erkenntnis der exakten Gesetze des zeiträumlichen Geschehens. Diese Gesetze (...) wären überhaupt die allgemeinsten Weltgesetze, aus denen sich der Inbegriff alles anderen Geschehens müßte deduzieren lassen.“  
*Albert Einstein (1879–1955)*

„Unermesslich ist das Königreich des Staubs. Anders als irdische Königreiche kennt es keine Grenzen. Kein Ozean markiert seine Schranken. Kein Gebirge engt es ein. Keine Längen- und Breitengrade bestimmen seine grenzenlosen Gebiete, und auch die entferntesten Sterne in den Unendlichkeiten des Raums können nicht mehr sein als blinkende Vorposten eines Reiches, das so unermesslich ist wie das Universum selbst.“

*J. Gordon Ogden: The Kingdom of Dust (1912)*

### STAUB ALS ZEICHEN

„Wenn der Staub sich steil und hoch erhebt, dann kommen Fahrzeuge, wenn er niedrig und breit ist, dann nähern sich Fußsoldaten. Verstreute Rauchfetzen zeigen Holzfäller an. Relativ kleine Staubmengen, die kommen und gehen, weisen darauf hin, daß ein Lager errichtet wird.“

*Sun Tzu (4./5. Jhr. v. Chr.): The Art of War*

„Der Staub, den wir mit Füßen treten – einst war er Leben.“

*Lord Byron (1788–1824)*

„flächen überzieht  
finger verhüllt  
an kleidern hängt  
aus winkeln quillt  
regale füllt  
im lichte spielt  
staub, mein verstreutes ebenbild“

*Ernst Jandl (1925–2000)*

„Doch der besondere Erklärungswert, der mit dem Staubkorn verbunden wird, sein wahrer metaphysischer Sinn, ist ohne Zweifel, daß dieses Staubkorn eine Synthese der Gegensätze bewerkstelligt: Es ist unberührbar und doch sichtbar. Seltsames Objekt, das nur einen Sinn berührt! Das sich in einer Art natürlicher Abstraktion präsentiert!“

*Gaston Bachelard (1884–1962)*

## ANGABEN ZU DEN AUTORINNEN UND AUTOREN

PROF. DR. FELIX AUERBACH, 1856-1933, theoretischer Physiker, war Schüler von Hermann von Helmholtz. 1890 gelang es Auerbach, ein Gerät zur absoluten Härtemessung zu entwickeln. Mit Wilhelm Horst gab Auerbach das Handbuch der physikalischen und technischen Mechanik heraus (7 Bde., 1927-1931). Unter seinen naturphilosophischen Schriften ist „Die Weltherrin und ihr Schatten“ (Jena 1913) die einflußreichste, sie ging aus dem hier in gekürzter Fassung wiedergegebenen Aufsatz hervor. Auerbach hatte seit 1889 ein Extraordinariat für theoretische Physik an der Universität Jena inne, 1923 wurde er zum ordentlichen Professor ernannt. Mit seiner Frau Anna nahm sich Felix Auerbach im Januar 1933 das Leben, da ihnen das zunehmend antisemitische Klima in Deutschland unerträglich geworden war.

DR. THOMAS BIERMANN, geb. 1957, studierte an der Universität Frankfurt Biologie und promovierte über den Einfluss erhöhter UV-B-Strahlung auf die Zellentwicklung von marinen Diatomeen. Seit 1999 leitet er den Fachbereich Faser- und Textilspuren des kriminaltechnischen Institutes des Bundeskriminalamtes in Wiesbaden.

DR. MARTIN EBERT, geb. 1970, arbeitet seit 1996 auf dem Gebiet atmosphärischer Aerosole. Seit dem Jahre 2000 ist er im Fachgebiet Umweltmineralogie der Angewandten Geowissenschaften der Technischen Universität Darmstadt beschäftigt und untersucht dort klimatische und gesundheitliche Auswirkungen von natürlichen und anthropogenen Aerosolen. Als analytische Methode bedient er sich der Elektronenmikroskopie. Mit Hilfe dieses Verfahrens können die einzelnen Partikel „sichtbar“ gemacht werden und im Hinblick auf Größe, Form, Mischungszustand und chemische Zusammensetzung charakterisiert werden.

PROF. DR. MANFRED EULER, geb. 1948, Diplom und Promotion in Physik an der Universität Gießen. Habilitation (Didaktik der Physik, Duisburg 1981). 1987-1991 Professor für Physik an der FH Hannover, danach Lehrstuhl für Didaktik der Physik an der Universität Paderborn, seit 1997 Direktor am Leibniz-Institut für die Pädagogik der

Naturwissenschaften an der Universität Kiel und Leiter der Abteilung Didaktik der Physik. Derzeit vor allem im Rahmen verschiedener nationaler und internationaler Projekte zur Verbesserung der Qualität des naturwissenschaftlichen Unterrichts tätig.

DR. HEIKE FESQ, geb. 1968, hat Medizin und Humanbiologie in Marburg studiert und in Immunologie promoviert. Ihre Facharztausbildung in Dermatologie und Allergologie hat sie in München absolviert, wo sie heute noch tätig ist.

DR. MARTINUS FESQ-MARTIN, geb. 1969, hat Biologie in München studiert. In seiner Promotion hat er mit Blütenstaub die Umweltgeschichte des Magellanischen Regenwaldes in Patagonien rekonstruiert. Er ist Lehrbeauftragter an den Universitäten Augsburg und München.

PROF. DR. ARNE FRIEDMANN, geb. 1969, seit 2002 Professor für Physische Geographie an der Universität Augsburg. Forschungsschwerpunkte: Biogeographie, Paläoökologie, Quartärforschung, Landschaftsgeschichte, Naturschutz.

FRANK GRÜNBERG, geb. 1966, studierte Physik und Journalistik und lebt in Wuppertal. Von der Erfahrung, lange Zeit in Reinräumen an Halbleitern geforscht zu haben, profitiert er noch heute, weil er als Autor bevorzugt über Entwicklungen in der Informationstechnologie und in den Werkstoffwissenschaften schreibt.

DR. ANDREAS HELLMANN, geb. 1963, ist Biologe und beschäftigte sich in seiner Promotion an der Uni Mainz mit molekularbiologischen Untersuchungen am pflanzlichen Cytoskelett. Er leitet seit 2004 den Fachbereich „Allgemeine Biologie, Mikrobiologie und Bodenkunde“ am Kriminaltechnischen Institut des Bundeskriminalamtes in Wiesbaden.

DR. ULRICH HOHOFF M.A., geb. 1956 in München, hat an der LMU München Germanistik, Philosophie und Theaterwissenschaft studiert und arbeitet als Leitender Bibliotheksdirektor. Er ist Autor von vier Büchern und zahlreichen Aufsätzen sowie Mitherausgeber der Zeitschrift ABI-Technik. 1993-1998 war er stellvertretender Direktor der Universitätsbibliothek Leipzig, seit 1999 ist er Direktor der Universi-

tätsbibliothek Augsburg.

STEPHANIE JAECKEL, geb. 1967, ist Kunsthistorikerin und arbeitet seit sechs Jahren als freie Autorin in Berlin. Sie schreibt Ausstellungstexte, Audioführungen und Hörfunkfeatures für den HR, SWR und für das Deutschlandradio Berlin.

DR. ERIK KRUPICKA, geb. 1973, ist Chemiker und promovierte 2001 an der Universität Ulm über die Kristallstrukturanalysen von polymeren Kupferverbindungen. Er ist seit 2002 auf dem Gebiet der forensischen Röntgenanalytik im Physikalischen Zentrallabor des Bundeskriminalamtes in Wiesbaden tätig.

DR. LUITGARD MARSCHALL, geb. 1964, studierte Pharmazie und promovierte im Fach Technikgeschichte. Als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Wissenschaftszentrum Umwelt der Universität Augsburg befasst sie sich derzeit vorrangig mit technik- und wissenssoziologischen Fragen. Mit ihren journalistischen Publikationen ist sie bestrebt, ihre vielfältigen Erfahrungen für den Wissenschafts- und Technikjournalismus fruchtbar zu machen.

PD DR. ANNETTE PETERS, geb. 1966 leitet die Arbeitsgruppe „Epidemiologie der Luftschadstoffwirkungen“ am GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Epidemiologie, Neuherberg. Sie studierte Biologie, Mathematik und Epidemiologie an den Universität Konstanz und Tübingen sowie an der Harvard University. Sie promovierte und habilitierte an der Medizinischen Fakultät der Ludwig-Maximilian Universität München. Der Schwerpunkt ihrer Arbeit liegt bei der Erforschung der Gesundheitsauswirkungen feiner und ultrafeiner Partikel auf das Herzkreislaufsystem.

DR. MICHAEL PETERS, geb. 1961, ist Leiter der Arbeitsgruppe für Paläobotanik am Institut für Vor- und Frühgeschichtliche Archäologie und Provinzialrömische Archäologie der Universität München. Schwerpunkt seiner Forschungsarbeiten ist die Landschafts- und Vegetationsgeschichte Südbayerns. Dabei wendet er als Methoden hauptsächlich die Pollenanalytik und die Analytik pflanzlicher Großreste an.

ELFIE PORZ, geb. 1953, schloss ihr Studium mit einer Diplomarbeit aus dem Themenkreis Psychologie des Alltags ab („Putzen als Ausdruck seelischer Prozesse“). Sie arbeitete in Köln als Psychoanalytikerin, anschließend bei der Gsponer Consulting International AG in Basel als Consultant. Mittlerweile hat sie sich wieder selbständig gemacht mit den Schwerpunkten Organisationsentwicklung und strategisches Human Resources Management.

MICHAEL PÜTZ, geb. 1969, ist Chemiker und beschäftigt sich in seiner Promotion an der Universität Marburg mit der kapillarelektrophoretischen Analyse von biogenen Drogen. Seit 2002 koordiniert er Forschungsprojekte über synthetische Drogen im Fachbereich Toxikologie des Bundeskriminalamtes in Wiesbaden.

PROF. DR. ARMIN RELLER, geb. 1952, von 1992 bis 1998 ordentlicher Professor am Institut für Anorganische und Angewandte Chemie der Universität Hamburg. Seit 1999 Inhaber des Lehrstuhls für Festkörperchemie der Universität Augsburg. Vorstandssprecher des Wissenschaftszentrums Umwelt der Universität Augsburg und Hauptherausgeber der Zeitschrift GAIA sowie Herausgeber der Zeitschrift „Progress in Solid State Chemistry“.

RAINER REMUS, geb. 1962, Studium der Umwelt- und Verfahrenstechnik in Berlin, ist seit 1991 wissenschaftlicher Mitarbeiter des Umweltbundesamtes. Im Fachgebiet Mineral- und Metallindustrie beschäftigt er sich mit industriellen Staub- und Feinstaubemissionen sowie mit diffusen Quellen und den Techniken zur Reinhaltung der Luft. Als Experte arbeitet er an der Festlegung von Anforderungen zur Minderung dieser Emissionen in verschiedenen nationalen und internationalen Gremien mit.

DR. RÜDIGER SCHUMACHER, geb. 1972, studierte Chemie an der Technischen Universität Darmstadt und untersuchte in seiner Promotion 2001 die Reaktivität verbrückter Eisen- und Mangankomplexe. Er ist seit 2003 im Fachbereich Schusspuren des Bundeskriminalamtes in Wiesbaden tätig.

DR. LOTHAR SCHÜTZ, geb. 1945, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Physik der Atmosphäre in Mainz. Seine Forschungs-

schwerpunkte sind die physiko-chemischen Eigenschaften von atmosphärischen Aerosolpartikeln. Lothar Schütz hat zahlreiche Expeditionen in die Sahara und in die Arktis geplant und durchgeführt.

DR. JENS SOENTGEN, geb. 1967, studierte Chemie (Staatsexamen 1994), wurde dann aber in Philosophie promoviert, mit einer Arbeit über den Stoffbegriff. Lehraufträge führten ihn an verschiedene Universitäten in Deutschland und nach Brasilien. Seit 2002 ist er wissenschaftlicher Leiter des Wissenschaftszentrums Umwelt.

DR. THOMAS STEPHAN, geb. 1963, Studium der Physik und der Astronomie an der Universität Heidelberg, arbeitet seit 1986 an der Untersuchung extraterrestrischer Materie. Zu seinen Untersuchungsobjekten gehören interplanetare und präsolare Staubkörner sowie Meteorite, unter anderem auch solche vom Planeten Mars. Er ist als Hochschuldozent an der Universität Münster tätig und dort zurzeit geschäftsführender Direktor des Instituts für Planetologie.

KNUT VÖLZKE, geb. 1968, studierte Produktgestaltung an der Kunsthochschule des Landes Hessen (HfG Offenbach). Als künstlerisch-wissenschaftlicher Projektleiter entwickelte er die Ausstellung „Staub – Spiegel der Umwelt“ für das Wissenschaftszentrum der Universität Augsburg unter der Leitung von Dr. Jens Soentgen. Mit seinem Designbüro (Leise Studio, Frankfurt am Main) arbeitet er im Bereich des Integrated Interior Design und er entwickelt neue Möbelkollektionen, die er unter seinem Label Leise® veröffentlicht.



## DANK

STAUB – SPIEGEL DER UMWELT ist nicht nur Titel für ein Buch, sondern auch Überschrift einer Ausstellung des Wissenschaftszentrums Umwelt der Universität Augsburg. Aus der Ausstellung ist die Idee für das Buch hervorgegangen. Ohne vielfältige weitere Hilfe wäre es uns nicht möglich gewesen, unser komplexes und ungewöhnliches Vorhaben zu realisieren. Bei folgenden Personen und Institutionen möchten wir uns nochmals ganz herzlich bedanken:

Marcus Abt, Physikalisches Institut, Universität Frankfurt am Main; Manfred Baier, Knauf Gips KG, Iphofen; Helmut Bast, Dr. Clement GmbH & Co. KG, Koblenz; Silke Bauer, Frankfurt am Main; Helmut Blast, Dr. Clement GmbH & Co. KG, Koblenz; Annette Blickhan-Krietsch, Merck KGaA, Darmstadt; Prof. Dr. Heiner Boehncke, Hessischer Rundfunk, Frankfurt am Main; Michael Botts, Laser Zentrum Hannover e.V., Hannover; Dr. Josef Cyrus, gsf – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Garching; Marc Doersam, primel interaktiv, Frankfurt am Main; Christel Dieker, Institut für Physik, Universität Augsburg; Renate Diessenbacher, Institut für Physik, Universität Augsburg; Guenter Dukek, Universität Augsburg; Dr. Martin Ebert, TU Darmstadt; ecotec Naturfarben GmbH, Lüdenscheid; Nicola Falckenreck, Rheda-Wiedenbrück; Sybille Fleckenstein, Wiesbaden; Kerstin Fleischer, Greenpeace e.V., Hamburg; Dr. Jörg-Thomas Franz, Labor für Milbenforschung, Universität Paderborn; Fuchs Gewürze GmbH & Co., Dissen; PD Dr. Armin Freund, IFM-GEOMAR, Leibniz-Institut für Meereswissenschaften, Universität Kiel; Claus Gärtner, Strahlenschutz, Kernkraftwerk Isar, EON Kernkraft GmbH, Essenbach; Jürgen Garziella, Spieth Gymnastik GmbH, Esslingen; PD Dr. Franz-J. Gießibl, Institut für Physik, Universität Augsburg, Kerstin

Gluth, Bad Vilbel; Prof. Dr. Johann G. Goldammer, Max Planck Institut für Chemie, Universität Freiburg; Thomas Gratza, Stadt Augsburg; Prof. Dr. Matthias Götz, Museum für Gestaltung, Basel; Frank Grünberg, Wuppertal; Dr. Christian Hagelüken, Umicore Precious Metals Refining, Hanau; Dr. Jan Hanss, Institut für Physik, Universität Augsburg; Dr. Eckhard Hartmann, Institut für Physik, Universität Augsburg; Dr. Markus Herz, Institut für Physik, Universität Augsburg; Thomas Hierse, Smiths Heimann GmbH, Wiesbaden; Hans-Jürgen Hofmann, Amberger Kaolinwerke Eduard Kick GmbH & Co. KG, Hirschau; Wolfgang Hofbauer, primel interaktiv, Frankfurt am Main; Jürgen Jakob, BASF AG, Ludwigshafen; Prof. Dr. Jucundus Jacobeit, Institut für Geographie, Universität Augsburg; Stephanie Jaeckel, Berlin; Andreas Kalytta, Institut für Physik, Universität Augsburg; Sigfried Keller, 3M Deutschland GmbH, Kamen; Thomas Keller, Berlin; Prof. Petra Kellner, Hochschule für Gestaltung, Offenbach; Kelm GmbH, Puchheim; Dr. Peter Kemper, Hessischer Rundfunk, Frankfurt am Main; Susanne Keßler, Schott Electronic Packaging GmbH, Landshut; Ulrich Klein, Hilti Deutschland GmbH, Kaufering; Harald Kocher, Ritterwand GmbH, Nufringen; Heinrich Kramwinkel, Mühlheim am Main; Anette Kreyser, Senden; Dr. Andreas Lehmann, Stuttgart; Ulrike Manz, Givaudan Deutschland GmbH, Dortmund; Dr. Simon Meißner, Wissenschaftszentrum Umwelt, Universität Augsburg; Klaus Mielke, Ovobest Eiprodukte GmbH, Neuenkirchen; Katja Mihajlovic, e-sisters ; Claudio Möllinger, Frankfurt am Main, Dr. Claus Müller, Institut für Physik, Universität Augsburg; Peter Mörtel, Anton Frank Mörtel KG, Schwabach; Konrad Nitzinger, Landesamt für Umweltschutz, Augsburg; Helmut Parr, Prüfstelle für Lufthygiene, Deutsche Montan Technologie GmbH, Essen; Heinz Peters, S&P Schäffer & Peters GmbH, Mühlheim am Main; Dr. Peter Rabl, Landesamt für Umweltschutz, Augsburg; Claudia Rall, Wissenschaftszentrum Umwelt, Universität Augsburg; Dr. Werner Reiffenhäuser, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, P. O. Reiter, Gemologisches Institut, Hettenrodt; Prof. Dr. Armin Reller, Institut für Physik, Universität Augsburg; Anne-Katrin Röhm, Henkel KGaA, Düsseldorf; Prof. Dr. Hartmut Roskos, Physikalisches Institut, Universität Frankfurt am Main; Andrea Sauer, Roßtal in Franken; Frank Heinrich Sauer, Optiker Müller, Frankfurt am Main; Gerold Matthias Sauter, Augsburg; Isabelle Sécher, Word Enviroment Center, Augsburg; Dieter Schwer, Frankfurt am Main; Christiane Sedelmayer, Cottan Cosmetic, Mün-

chen; Cornelia Stermann, Penaten, Johnson & Johnson GmbH, Düsseldorf; Dr. Monika Schulze, Umweltambulanz, Zentralklinikum Augsburg; Dr. Rüdiger Schumacher, Bundeskriminalamt, Wiesbaden; Charlotte Schmitt, Smiths Heimann GmbH, Wiesbaden; Dr. Eckart Schultz, Medizin-Meteorologie, Deutscher Wetterdienst, Freiburg; Margarete Strecker, Akzo Nobel Powder Coatings GmbH, Reutlingen; Prof. Dr. Axel Tuma, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Universität Augsburg; Stephanie Töwe, Greenpeace e.V., Hamburg; Bea T. und Ina T., Köln; Thomas Vettori, Freiburg; Prof. Dr. Bernd Wagner, ZWW, Universität Augsburg; Dr. Anke Weidenkaff, EMPA / Schweiz; Silke Weigel, Institut für Physik, Universität Augsburg, Margarete Wilhelm, Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst, Bad Lipp-springe; Gunther Winzer, Winzer Laborglastechnik, Wertheim; Prof. Dr. Achim Wixforth, Institut für Physik, Universität Augsburg; Petra Zimlich, Campus Verlag, Frankfurt am Main; Prof. Dr. Ralf Zimmermann, Institut für Physik, Universität Augsburg; Mikro Zobel, Ober-tshausen, Klaus Zöttl, Augsburg.